

ISSN 2786-6955

UDC 57:54:664

1

# BHT 2025

BIOTA. HUMAN. TECHNOLOGY

International Scientific Journal

Electronic Edition





# BHT

# 2025 | 1

## International Scientific Journal

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

The Journal publishes original research papers, review articles and short communication papers in the fields of Biological Sciences, Health, Food and Chemical Technologies.

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

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

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

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

### Journal is indexed in databases and search engines:

Crossref    ROAD    WorldCat    Simon Fraser University Library

V.I. Vernadskiy National Library of Ukraine    EuroPub

Google Scholar    ICI Journals Master List (2023)

**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)

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

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

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

**Olga I. SYZA**  
(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

**Yulia V. BONDARENKO**

Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor  
National Technical University of Ukraine "Igor  
Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine

**Olena E. CHYHYRYNETZ**

Doctor of Technical Sciences, Professor  
National Technical University of Ukraine "Igor  
Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine

**Nataliia R. DEMCHENKO**

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

**Natalia V. GREVTSEVA**

Ph.D. in Technical Sciences, Professor  
V.N. Karazin Kharkiv National University, 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

**Olena Yu. KUPCHYK**

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

**Natalia M. KURCHALUK**

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

**Svitlana V. KYRIIENKO**

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

**Nadiia V. LAPITSKA**

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

**Anatoliy LEVANETS**

PhD in Biological Sciences  
North-West University, South Africa

**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

**Olga B. MEKHED**

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

**Tetiana V. MOROZOVA**

Ph.D. in Biological Sciences, Associate Professor  
National Transport University,  
Kyiv, Ukraine

**Svitlana H. OLIINYK**

Ph.D. in Technical Sciences,  
Associate Professor  
State Biotechnological University, Ukraine

**Lee T. OSTROM**

Ph.D., Professor  
University of Idaho, USA

**Kateryna V. RUBANKA**

Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor  
National University of Food Technologies, Ukraine

**Olga V. SAMOKHVALOVA**

Ph.D. in Technical Sciences, Professor  
State Biotechnological University, Ukraine

**Olesia M. SAVCHENKO**

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

**Mariia I. SHANAIDA**

Doctor in Pharm. Sciences, Associate Professor,  
Ph.D. in Biological Sciences  
I. Horbachevsky Ternopil National Medical University, Ukraine

**Nataliia O. SMOLIAR**

Ph.D. in Biological Sciences, Associate Professor  
National University "Yuri Kondratyuk  
Poltava Polytechnic", Ukraine

**Stepan N. VADZYUK**

Doctor of Medical Sciences, Professor  
I. Horbachevsky Ternopil National Medical  
University, Ukraine

**Viktoria I. VOROBYOVA**

Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor  
National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine

**Liubov B. ZELENA**

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

## Foreword

### from the Editor-in-Chief

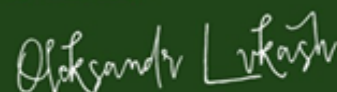
There is no need to convince readers of the first our issue that the natural environment is created and maintained by living organisms, the totality of which is biota. The study of the diversity of living, which began since the day of Hippocrates, Aristotle, and Theophrastus, has not lost its relevance 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, Ecology, Health, 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 look forward to articles on the problems of the functioning of biological systems (including the human body), biodiversity protection of the environment, as well as healthy human nutrition and technological processes.

The BHT Journal pages always have a place to cover the results of scientific discussions which were made by researchers from all the world.

Respectfully Yours,  
Prof. O. Lukash



# CONTENTS

## PHYTOBIOTA

ФІТОБІОТА

*Євгеній Асмаковський*

**СИНТАКСОНОМІЯ ЗАПЛАВНИХ ЛІСІВ БАСЕЙНУ РІЧКИ СНОВ**

*Yevhenii Asmakovskyi*

**THE SYNTAXONOMY OF FLOODPLAIN FORESTS OF THE SNOV RIVER BASIN**

[in Ukrainian]

- 10 -

*Володимир Феденко*

**СВІТЛОПОГЛИНАЛЬНА ЗДАТНІСТЬ КВІТОК ІНВАЗІЙНОГО ВИДУ  
AMBROSIA ARTEMISIIFOLIA L.**

*Volodymyr Fedenko*

**LIGHT ABSORPTION CAPACITY OF FLOWERS OF THE INVASIVE SPECIES  
AMBROSIA ARTEMISIIFOLIA L.**

[in Ukrainian]

- 28 -

## ENVIRONMENTAL POLLUTION STRESSES AND ORGANISMS' RESPONSE

**СТРЕСИ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ  
ТА РЕАКЦІЯ ОРГАНІЗМІВ**

*Dmytrii Filonenko, Olha Mekhed*

**ASSESSMENT OF THE COMBINED EFFECT  
OF HEAVY METALS AND SURFACTANTS ON CARP FISH ORGANISMS**

*Дмитрій Філоненко, Ольга Мехед*

**ОЦІНКА КОМБІНОВАНОГО ВПЛИВУ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ І  
ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН НА ОРГАНІЗМ КОРОПОВИХ РИБ**

[in English]

- 40 -

## FUNCTIONING OF BIOLOGICAL SYSTEMS

ФУНКЦІОНУВАННЯ БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

*Валерія Мізін, Олена Севериновська*

**ЕФЕКТИ КОФЕЇНУ В МОДЕЛЯХ ДЕПРЕСІЇ У САМОК ЩУРІВ**

*Valeriia Mizin, Olena Severynovska*

**EFFECTS OF CAFFEINE IN FEMALE RAT MODELS OF DEPRESSION**

[in Ukrainian]

- 49 -

## MAN AND HIS HEALTH

ЛЮДИНА ТА ЇЇ ЗДОРОВ'Я

*Małgorzata Gradziuk, Halina Tkaczenko, Natalia Kurhaluk*

**WYZWANIA I MOŻLIWOŚCI W TWORZENIU SZTUCZNEJ KRWI**

*Małgorzata Gradziuk, Halina Tkaczenko, Natalia Kurhaluk*

**CHALLENGES AND OPPORTUNITIES IN ARTIFICIAL BLOOD**

[in Polish]

- 59 -

*Галина Ткаченко, Тетяна Тюпова, Валентина Мовчан,*

*Олександр Лукаш, Наталія Кургалюк*

**ФІТОТЕРАПЕВТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ІМБИРУ  
(ZINGIBER OFFICINALE)**

*Halina Tkaczenko, Tetiana Tiupova, Valentyna Movchan,*

*Oleksandr Lukash, Natalia Kurhaluk*

**PHYTOTHERAPEUTIC USE OF GINGER  
(ZINGIBER OFFICINALE)**

[in Ukrainian]

- 94 -

 **ANTHROPOGENIC TRANSFORMATION**   
**OF ECOSYSTEMS**

**АНТРОПОГЕННА ТРАНСФОРМАЦІЯ  
ЕКОСИСТЕМ**

*Ольга Бєдункова, Павло Кузнєцов*

**ДОСЛІДЖЕННЯ ОРГАНІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД РІЧКИ  
У ЗОНІ АНТРОПОГЕННОГО ВПЛИВУ ВОДНОГО СКИДУ**

*Olha Biedunkova, Pavlo Kuznietsov*

**STUDY OF ORGANIC POLLUTION OF SURFACE WATERS OF THE RIVER  
IN THE ZONE OF ANTHROPOGENIC IMPACT OF WATER DISCHARGE**

[in Ukrainian]

- 126 -

 **FOOD TECHNOLOGIES**   
**ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ**

*Надія Лапицька, Олена Рибалочко, Діана Кавурко*

**КВАЛІМЕТРИЧНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ЗАМОРОЖЕНИХ ДЕСЕРТІВ МОТІ,  
ВИГОТОВЛЕНИХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПОБІЧНИХ ПРОДУКТІВ  
СОКОВОГО ВИРОБНИЦТВА**

*Nadiia Lapytska, Olena Rybalochko, Diana Kavurko*

**QUALIMETRIC EVALUATION OF THE MOCHI FROZEN DESSERTS MADE USING  
BY-PRODUCTS OF JUICE PRODUCTION**

[in Ukrainian]

- 138 -

*Анна Геліх*

**НИЗЬКОАЛЕРГЕННЕ ПІСОЧНЕ ПЕЧИВО ЗБАГАЧЕНЕ ПОРОШКОМ МАНІОКА  
ТА АЛЬТЕРНАТИВНИМ БІЛКОМ ДЛЯ ХАРЧУВАННЯ ВІЙСЬКОВИХ**

*Anna Helikh*

**LOW-ALLERGENIC SHORT COOKIES ENRICHED WITH CASSAVA POWDER  
AND ALTERNATIVE PROTEIN FOR MILITARY NUTRITION**

[in Ukrainian]

- 148 -



*Алла Башта, Наталія Стеценко, Світлана Бажай-Жежерун*  
**ПІДВИЩЕННЯ ХАРЧОВОЇ ЦІННОСТІ ТА РОЗШИРЕННЯ АСОРТИМЕНТУ  
СОУСІВ ОЗДОРОВЧОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

*Alla Bashta, Natalia Stetsenko, Svitlana Bazhay-Zhezherun*  
**INCREASING THE NUTRITIONAL VALUE AND EXPANDING THE RANGE  
OF SAUCES FOR HEALTH**

[in Ukrainian]

- 161 -

 **CHEMICAL TECHNOLOGIES** 

**ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

*Олена Бондар, Інна Тарасенко, Ірина Курмакова, Олександр Макей*  
**КВАНТОВО-ХІМІЧНІ ДЕСКРИПТОРИ ТА БІОЛОГІЧНА АКТИВНІСТЬ  
2-АМІНО-4-АРИЛ-1,3-ОКСАЗОЛІВ**

*Olena Bondar, Inna Tarasenko, Iryna Kurmakova, Olexandr Makei*  
**QUANTUM CHEMICAL DESCRIPTORS AND BIOLOGICAL ACTIVITY  
OF 2-AMINO-4-ARYL-1,3-OXAZOLES**

[in Ukrainian]

- 177 -

*Олександр Смольський, Олена Бондар, Ірина Курмакова,  
Андрій Котельчук, Леонід Котельчук*  
**ПИТНА ВОДОПРОВІДНА ВОДА МІСТА ЧЕРНІГІВ ТА ЇЇ ЯКІСТЬ**

*Olexandr Smolsky, Olena Bondar, Iryna Kurmakova,  
Andrij Kotelchuk, Leonid Kotelchuk*  
**DRINKING WATER OF CHERNIGIV AND ITS QUALITY**

[in Ukrainian]

- 188 -

*Олексій Гуменюк, Інна Трус*  
**АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ КОРОЗІЇ**

*Oleksii Humeniuk, Inna Trus*  
**ANALYSIS OF MODERN CORROSION RATE MEASUREMENT METHODS**

[in Ukrainian]

- 197 -

 **SHORT COMMUNICATIONS** 

КОРОТКІ ПОВІДОМЛЕННЯ

*Iryna Shyndanovina*

**COSMARIUM MANDOSII VAN WESTEN & COESEL 2020  
(ZYGNEMATOPHYCEAE, STREPTOPHYTA), NEW SPECIES FOR UKRAINE,  
THE SECOND RECORD IN THE WORLD AFTER AUTHORS DESCRIPTION  
IN THE NETHERLANDS**

*Ірина Шиндановіна*

**COSMARIUM MANDOSII VAN WESTEN & COESEL 2020  
(ZYGNEMATOPHYCEAE, STREPTOPHYTA) – НОВИЙ ДЛЯ УКРАЇНИ ВИД,  
ДРУГА ЗНАХІДКА В СВІТІ ПІСЛЯ ЙОГО ПЕРШООПИСУ В НІДЕРЛАНДАХ**

[in English]

- 212 -

 **INSTRUCTIONS FOR AUTHORS** 

КЕРІВНИЦТВО ДЛЯ АВТОРІВ

[in English / in Ukrainian]

- 221 -





**ΡΗΥΤΟΒΙΟΤΑ**

**ΦΙΤΟΒΙΟΤΑ**





Copyright (c) 2025 Yevhenii Asmakovskyi

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/).

**Євгеній Асмаковський****СИНТАКСОНОМІЯ ЗАПЛАВНИХ ЛІСІВ БАСЕЙНУ РІЧКИ СНОВ**

Yevhenii Asmakovskyi

**THE SYNTAXONOMY OF FLOODPLAIN FORESTS  
OF THE SNOV RIVER BASIN****АНОТАЦІЯ**

**Мета роботи.** Встановити синтаксономічні одиниці угруповань заплавної лісової території басейну річки Снов.

**Методологія.** Стаття містить систематизовані та узагальнені результати вивчення синтаксономічного складу угруповань заплавної лісової території басейну річки Снов в основі польових досліджень 2019–2024 року за результатом яких складено 61 геоботанічний опис. Класифікацію рослинних угруповань здійснено за принципами флористичної класифікації рослинності Браун – Бланке.

**Наукова новизна.** Встановлено сучасний синтаксономічний склад вільхових та вербово-тополевих заплавної лісової території басейну річки Снов.

**Висновки.** Розподіл лісової рослинності в межах території досліджень визначається переважно едафічними та гідрологічними чинниками, які обумовлюють формування угруповань заплавної лісової території досліджень. Лісова рослинність заплавної лісової території басейну річки Снов представлена 2 класами, 2 порядками, 2 союзами та 10 асоціаціями відповідно, а саме: класом *Salicetea purpureae* Moor 1958 який представлений порядком *Salicetalia purpureae* Moor 1958, союзу *Salicion albae* Soó 1951, який включає чотири асоціації *Salicetum albae* Issler 1926, *Poo nemoralis-Salicetum albae* Shevchuk et Solomakha 1996, *Salici-Populetum* (Tx. 1931) Meijer-Drees 1936, *Populetum nigro-albae* Slavnić 1952 та класом *Alnetea glutinosae* Br.-Bl. et Tx. ex Westhoff et al. 1946, який представлений порядком *Alnetalia glutinosae* Tx. 1937, союзу *Alnion glutinosae* Malcuit 1929 та включає шість асоціацій *Ribo nigri-Alnetum* Solińska-Górnicka (1975) 1987, *Carici acutiformis-Alnetum* Scamoni 1935, *Carici elongatae-Alnetum* Schwickerath 1933, *Angelico sylvestri-Alnetum* Borhidi 1966, *Urtico dioicae-Alnetum glutinosae* (Scamoni 1935) Fukarek 1961, *Carici elatae-Alnetum glutinosae* Franz 1990. Досліджувана заплавна лісова рослинність відноситься до лісових біотопів Д1.6. Синсозологічний статус мають асоціації *Salicetum albae*, *Salici-Populetum*, *Populetum nigro-albae* класу *Salicetea purpureae* та охороняються за Директивою Ради Європи 92/43/ЄЕС. Угруповання з класу *Alnetea glutinosae* охоронного статусу не мають, проте асоціації *Carici elongatae-Alnetum* потребують охорони. Раритетна компонента флористичного ядра асоціацій представлена трьома видами, серед них *Equisetum hyemale* L., *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, *Hottonia palustris* L., які мають регіонально рідкісний статус охорони в Чернігівській області.

**Ключові слова:** лісова рослинність, синтаксономія, Чернігівське та Новгород-Сіверське Полісся, басейн річки Снов

**ABSTRACT**

**Purpose of the work.** To establish syntaxonomic units of groups of floodplain forests of the Snov river basin.

**Methodology.** The article contains the systematized and generalized results of the study of the syntaxonomic composition of the groups of floodplain forests of the Snov River basin as a basis for field research in 2019–2024, as a result of which 61 geobotanical descriptions. The classification of forest vegetation was carried out according to the principles of the Braun – Blanquet floristic classification of vegetation.

**Scientific novelty.** The modern syntaxonomic structure of alder and willow-poplar floodplain forests of the Snov River basin has been established.

**Conclusions.** The distribution of forest vegetation within the study area is determined mainly by edaphic and hydrological factors, which determine the formation of the floodplain forest grouping of the study area. The forest vegetation of the floodplain forests of the Snov River basin is represented by 2 classes, 2 orders, 2 unions and

10 associations, respectively, namely: the class *Salicetea purpureae* Moor 1958, which is represented by the order *Salicetalia purpureae* Moor 1958, the union *Salicion albae* Soó 1951, which includes four associations *Salicetum albae* Issler 1926, *Poo nemoralis-Salicetum albae* Shevchyk et Solomakha 1996, *Salici-Populetum* (Tx. 1931) Meijer-Drees 1936, *Populetum nigro-albae* Slavnić 1952 and the class *Alnetea glutinosae* Br.-Bl. et. Tx. ex Westhoff et al. 1946, which is represented by the order *Alnetalia glutinosae* Tx. 1937, the union *Alnion glutinosae* Malcuit 1929 and includes six associations *Ribo nigri-Alnetum* Solińska-Górnicka (1975) 1987, *Carici acutiformis-Alnetum* Scamoni 1935, *Carici elongatae-Alnetum* Schwickerath 1933, *Angelico sylvestri-Alnetum* Borhidi 1966, *Urtico dioicae-Alnetum glutinosae* (Scamoni 1935) Fukarek 1961, *Carici elatae-Alnetum glutinosae* Franz 1990. The studied floodplain forest vegetation belongs to forest biotopes D1.6. The associations *Salicetum albae*, *Salici-Populetum*, *Populetum nigro-albae* of the *Salicetea purpureae* class have synzozological status and are protected under the European Council Directive 92/43/EEC. The groups of the *Alnetea glutinosae* class do not have a protected status, but the *Carici elongatae-Alnetum* associations require protection. The rare component of the floristic core of the associations is represented by three species, among them *Equisetum hyemale* L., *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, *Hottonia palustris* L., which have a regionally rare status in the Chernihiv region.

**Key words:** forest vegetation, syntaxonomy, Chernihiv and Novhorod-Siversk Polesie, Snov river basin

### Постановка проблеми

Лісистість лівобережнополіських заплав становить близько 7 %, яку формують заплавні лісові екосистеми, які є рідкісними біотопами існування флори та фауни зі своїми специфічними лісорослинними умовами та біоценозами (Karpenko, 2010). Ці екосистеми дуже вразливі, на які негативно впливає господарське освоєння прибережних зон та кліматичні особливості регіону. Заплавні лісові екосистеми потребують спеціальних підходів до менеджменту тому, що рекреаційне навантаження на них перевищує гранично допустимі норми, в результаті яких змінюється структура заплавного ландшафту та поширення інвазійних видів (WWF Ukraine, 2025).

Заплавні ліси зростають в умовах щорічного затоплення під час весняних повеней. На формування цих лісів впливають гідроекологічні процеси річки (різні руслові та алювіальні процеси). Природне призначення заплачних лісів – регулювання паводків та очищення води, зокрема вони підтримують рівень ґрунтових вод, впливають на випаровування, закріплюють береги.

В історичній ретроспективі заплавна лісова рослинність регіону висвітлена у працях ряду науковців, серед них: Т. Л. Андрієнко, О. В. Лукаш, Ю. О. Карпенко, О. І. Яковенко (Andrienko, 2006; Lukash, 2012; Karpenko 2010, 2012; Karpenko & Asmakovsky, 2024; Yakovenko, 2023, 2024), які присвячені вивченню флористичних та ценотичних особливостей угруповань заплачних лісів, геоінформаційних систем, як інструменту аналізу деревної лісової рослинності (в тому числі – заплавної), об'єктів природно-заповідного фонду, до якого включені ці

угруповання та як окремих елементів екологічної мережі. Загалом лісова заплавна рослинність регіону досліджень вивчена спорадично, а тому її подальше вивчення є важливим елементом для розуміння участі її в процесах гідроекологічного розвитку річкового басейну, формування ефективної системи охорони та їх місця в екомережі регіону.

### Матеріали та методи дослідження

Стаття містить систематизовані та узагальнені результати вивчення синтаксономічного складу заплачних лісів басейну річки Снов на основі польових досліджень 2019 - 2024 року, за результатами яких було складено 61 геоботанічний опис. Маршрути досліджень попередньо формувалися за допомогою додатку Google Maps в опції «Супутник». Під час геоботанічних досліджень застосовували маршрутні та напівстаціонарні методи (Yakubenko et al., 2018).

Прив'язка до кварталної сітки лісництв здійснювалась за допомогою лісотаксаційних мап лісових господарств філій ДП «Ліси України» 2011 року лісовпорядкування (масштаб 1:25000). Класифікацію рослинних угруповань здійснено за принципами флористичної класифікації рослинності Браун-Бланке. Визначали проективне покриття ярусів рослинного угруповання та кожного виду. Діапазони проективного покриття переведено у наступну бальну шкалу: + – до 1 %, 1 – 1–5 %, 2 – 6–15 %, 3 – 16–25 %, 4 – 26–50 %, 5 > 50 %. (Yakovenko, 2024). Для визначення синтаксономічних одиниць було використано «Продромус рослинності України» (Dubyna et al., 2019). Актуальні назви таксонів судин-

них рослин наведені за World Flora Online (WFO, 2025).

### Результати та їх обговорення

Басейн річки Снов розташований на півночі Чернігівської області та займає площу в 5380 км<sup>2</sup> (рис. 1). Його територія має добре розвинену гідрологічну систему

водних об'єктів. Довжина річки в межах України становить близько 200 км. Русло розгалужене, дуже звивисте, яке утворює піщані пляжі, плесові ділянки, які переважають над перекатами. До лівої та правої притоки річки входять 14 малих річок, серед яких найбільшою є р. Ревна довжиною 81 км та площею водозбору 1660 км<sup>2</sup> (Karpenko & Asmakovsky, 2024).

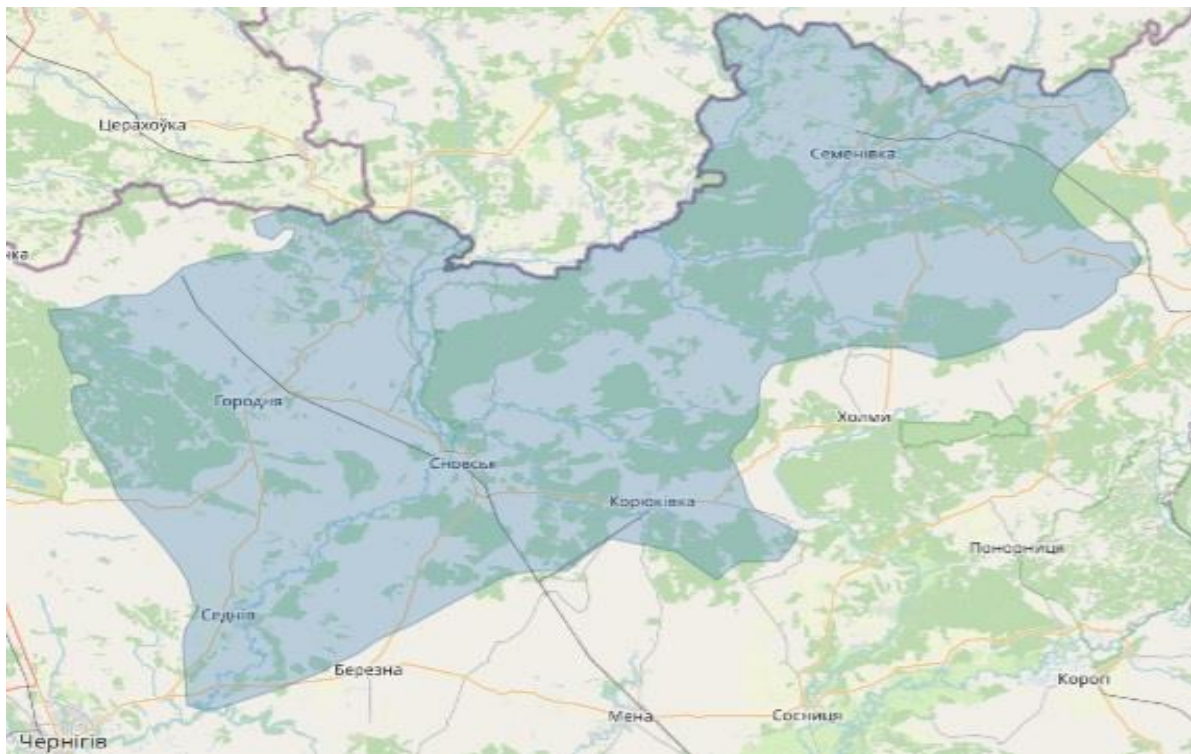


Рис. 1. Картографічна схема басейну річки Снов (QGIS)

Розгалужена гідрологічна мережа цього регіону визначає структурованість та мозаїчність рельєфу, у тому числі й заплави. Територія досліджень згідно фізико-географічного районування відноситься до фізико-географічної області – Чернігівського та Новгород-Сіверського Полісся, що лежать у межах Дніпровсько-Донецької западини, а згідно Геоботанічного районування в Європейській широколистяно-лісовій області Східноєвропейської провінції хвойно-широколистяних та широколистяних лісів Лівобережнополіського округу дубово-соснових, дубових, соснових лісів, заплавної луки і евтрофних боліт (Rudenko, 2007).

Лісові території належать до 5 лісових господарств, що розподілені по 25 філіям лісництва ДП «Ліси України», а також лісового фонду, що входить до 5 лісництв КП

«Чернігівоблагреліс» в межах Чернігівського, Корюківського та Новгород-Сіверського районів.

Розподіл лісової рослинності в межах території досліджень визначається переважно едафічними та гідрологічними чинниками, які обумовлюють формування угруповання заплавної лісової території досліджень (Lukash, 2008).

Лісова рослинність заплавної лісової території басейну річки Снов представлена 2 класами, 2 порядками, 2 союзами та 10 асоціаціями відповідно (Dubyna et al., 2019). Нижче представлено класифікаційну схему угруповань заплавної лісової території басейну річки Снов за Браун-Бланке, яка виглядає наступним чином:

**Клас *Salicetea purpureae* Moor 1958**

**Порядок *Salicetalia purpureae* Moor 1958**

Союз *Salicion albae* Soó 1951,  
Асоціація *Salicetum albae* Issler 1926  
Асоціація *Poo nemoralis-Salicetum albae*  
Shevchuk et Solomakha 1996  
Асоціація *Salici-Populetum* (Тх. 1931)  
Meijer-Drees 1936  
Асоціація *Populetum nigro-albae* Slavnić  
1952

**Клас *Alnetea glutinosae* Br.-Bl. et. Тх.  
ex Westhoff et al. 1946**

Порядок *Alnetalia glutinosae* Тх. 1937  
Союз *Alnion glutinosae* Malcuit 1929  
Асоціація *Ribo nigri-Alnetum* Solińska-  
Górnicka (1975) 1987  
Асоціація *Carici acutiformis-Alnetum*  
Scamoni 1935  
Асоціація *Carici elongatae-Alnetum*  
Schwickerath 1933  
Асоціація *Angelico sylvestri-Alnetum* Borhidi  
1966  
Асоціація *Urtico dioicae-Alnetum glutinosae*  
(Scamoni 1935) Fukarek 1961  
Асоціація *Carici elatae-Alnetum glutinosae*  
Franz 1990

Клас *Salicetea purpureae* включає заплавні деревні вербові й тополеві, а також чагарникові угруповання та насадження на вологих мулуватоболотних, дернових, піщаних. Клас представлений порядком *Salicetalia purpureae* (Dubyna et al., 2019). Діагностичні та характерні види: *Amorpha fruticosa* L., *Calystegia sepium* (L.) R.Br., *Salix fragilis* L., *Salix purpurea* L., *Salix triandra* L., *Salix viminalis* L., *Symphytum officinale* L. (табл. 1).

Порядок *Salicetalia purpureae* включає угруповання вербових та вербово-тополевих лісів на піщаних алювіальних слабозадренованих ґрунтах. Порядок представлений союзом *Salicion albae* який включає угруповання заплавних прируслових і притерасних вербових і тополевих лісів і чагарників коротко-, середньо- і тривалозаливних ділянок на слабозадренованих піщано-мулистих і піщаних ґрунтах з близьким заляганням до поверхні прісних ґрунтових вод, який представлений 4 асоціаціями *Salicetum albae*, *Poo nemoralis-Salicetum albae*, *Salici-Populetum*, *Populetum nigro-albae* (Dubyna et al., 2019). Діагностичні та характерні види: *Galium aparine* L., *Humulus lupulus* L., *Ranunculus repens* L., *Rubus caesius* L., *Salix alba* L., *Solanum dulcamara*, *Urtica dioica* L. (табл. 1).

Асоціація *Salicetum albae* (табл. 1, описи 1–9). Угруповання асоціації формуються на рівнинних місцезростаннях у перехідній зоні від прируслової до центральної частини заплави, де значно послаблюються алювіально-ерозійні процеси і формуються супіщані лучні ґрунти (Dubyna et al., 2019). Всього асоціація налічує до 60 видів. Середня видова насиченість становить 24–30 видів. Деревостан сформований *Salix alba* L., інколи зустрічаються *Populus alba* L., *P. nigra* L., *Salix fragilis* L. але значної участі в його формуванні вони не мають. Висота деревного ярусу – 15–20 м, подекуди до 25 м, зімкненість крон – 60–70 %. Чагарниковий ярус угруповань (часто відсутній) має зімкненість на рівні 5–20 % з висотою до 5 м, який сформований такими видами: *Amorpha fruticosa* L., *Rubus caesius* L., *Salix triandra* L., *S. viminalis* L. Трав'яний ярус угруповань сформований за участі *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth, *Carex acutiformis* Ehrh., *Humulus lupulus* L., *Phalaris arundinacea* L., *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., *Poa nemoralis* L., *Scutellaria galericulata* L., *Stachys palustris* L., *Thelypteris palustris* Schott, *Urtica dioica* L. загальним проективним покриттям на рівні 60–80 %. Угруповання були відмічені в заплаві р. Десна, біля с. Боромики, заплаві р. Снов, біля с. Снов'янка, селища Седнів Чернігівського р-ну.; околицях м. Сновськ, с. Старі Боровичи, Гірськ Корюківського р-ну.; у заплаві р. Ревна на околицях м. Семенівка Новгород-Сіверського р-ну. Діагностичні та характерні види: *Stachys palustris*, *Phalaris arundinacea* (табл. 1).

Асоціація *Poo nemoralis - Salicetum albae* (табл. 1, описи 10–13). Угруповання асоціації формуються на відносно багатих і добре дренованих дерново шаруватоглеюватих легкосупіщаних ґрунтах, які затоплюються під час весняних повеней і залишаються вологими влітку. Вони є заплавно-лісовими ценозами, які рідко трапляються невеликими «острівцями» у зрілій частині заплави річок на підвищеннях низького рівня (Dubyna et al., 2019). Всього асоціація налічує до 42 видів. Середня видова насиченість становить 15–23 видів. Деревостан сформований *Salix alba*, одинично присутня *Populus alba*. Висота деревного ярусу – 15–20 м, зімкненість крон – 60–70 %. Чагарникового ярусу майже нема, місцями в угрупованнях він сформований за участі *Rubus caesius* та має зімкненість не більше 5 %. Трав'яний ярус угруповань сформований за участі *Poa*



*nemoralis*, *Phragmites australis*, *Scrophularia nodosa* L., *Scutellaria galericulata*, *Urtica dioica* з загальним проєктивним покриттям на рівні 60–80 % та низки видів, які значної участі в травостої не становлять. Угрупування були відмічені в заплаві р. Снов біля с. Снов'янка, Бігач, селища Седнів Чернігівського р-ну.; біля с. Гірськ Корюківського р-ну. Діагностичні та характерні види: *Poa nemoralis*, *Scrophularia nodosa*, *Scutellaria galericulata* (табл. 1).

Асоціація *Salici-Populetum* (табл. 1, описи 14–16). Угрупування асоціації формуються ділянках з дерново-піщаними та лучно-болотними ґрунтами, які витримують тривале затоплення і розміщуються за смугою прируслових вербняків (Dubyna et al., 2019). Всього асоціація налічує до 35 видів. Середня видова насиченість становить 18–22 видів. Деревостан сформований за участі *Salix alba* та *Populus alba*. Фрагментарно присутня *Populus nigra*. Висота деревного ярусу – 15–22 м, зімкненість крон – 60–80 %. Чагарниковий ярус в угрупованнях відсутній, одинично присутні *Amorpha fruticosa*, *Salix fragilis* з підростом *Populus nigra*, *Salix alba*. Трав'яний ярус угруповань сформований за участі *Agrostis stolonifera* L., *Scrophularia nodosa*, *Scutellaria galericulata*, *Phragmites australis*, *Urtica dioica* з загальним проєктивним покриттям на рівні 60–70 % та низки інших видів. Угрупування були

відмічені в заплаві р. Десна біля с. Боромики, заплаві р. Снов біля с. Малий Дирчин Чернігівського р-ну.; на оклицях с. Нові Боровичи Корюківського р-ну. Діагностичні та характерні види: *Agrostis stolonifera*, *Populus nigra* (табл. 1).

Асоціація *Populetum nigro-albae* (табл. 1, описи 17–20). Угрупування асоціації формуються на підвищених ділянках з дерново-піщаними і лучно-болотними ґрунтами в умовах періодичного затоплення (Dubyna et al., 2019). Всього асоціація налічує до 39 видів. Середня видова насиченість становить 17–21 видів. Деревостан сформований в рівній пропорції за участі *Populus alba* та *P. nigra*. Висота деревного ярусу – 15–24 м, зімкненість крон – 60–80 %. Чагарниковий ярус угруповань розріджений та становить не більше 10 %. Сформований *Amorpha fruticosa*, *Rubus caesius*, *Salix triandra*, *Sambucus nigra*. Трав'яний ярус угруповань формується за участі *Agrostis stolonifera*, *Poa nemoralis*, *Phragmites australis*, *Urtica dioica* та іншими видами з загальним проєктивним покриттям в 50–70 %. Угрупування відмічені в заплаві р. Снов біля с. Малий Дирчин Чернігівського р-ну.; біля с. Нові Боровичи Корюківського р-ну.; заплаві р. Ревна, м. Семенівка та околиць с. Залізний Міст Новгород-Сіверського р-ну. Діагностичні та характерні види: *Populus alba*, *Phragmites australis* (табл. 1).

Таблиця 1

#### Фітоценотична характеристика угруповань класу *Salicetea purpureae* Moor 1958

Синтаксон, №	1									2				3			4			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Номер опису, №																				
Площа опису, м <sup>2</sup>	250	300	200	300	250	300	200	300	200	200	300	300	200	200	200	200	200	250	300	200
Зімкненість крон деревостану, %	70	60	70	70	65	75	50	60	70	60	70	70	60	70	60	80	60	70	60	60
Зімкненість чагарникового ярусу, %	15	10	-	20	5	5	-	-	5	5	-	5	-	-	-	-	10	-	5	5
Проєктивне покриття трав'яного ярусу, %	60	70	65	80	60	70	60	70	70	60	70	60	60	70	60	60	70	70	70	50
Проєктивне покриття мохового ярусу, %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Діагностичні та характерні види асоціації <i>Salicetum albae</i> Issler 1926:																				
<i>Stachys palustris</i> L.	2	2	1	1	2	1	2	1	2	·	+	1	·	·	·	+	·	1	·	·
<i>Phalaris arundinacea</i> L.	1	2	2	3	1	3	1	2	2	·	·	1	1	·	·	1	·	·	+	1

<b>Діагностичні та характерні види асоціації <i>Poo nemoralis-Salicetum albae</i> Shevchyk et Solomakha 1996:</b>	
<i>Poa nemoralis</i> L.	+ · 1 · + · · 1 · <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">3 2 1 2</span> · · · 2 1 2 1
<i>Scrophularia nodosa</i> L.	+ · + · + · + · + <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2 + 2 1</span> 1 + 1 + · · ·
<i>Scutellaria galericulata</i> L.	1 + 1 2 1 + 1 + + <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1 1 + 2</span> + 1 + · 1 1 ·
<b>Діагностичні та характерні види асоціації <i>Salici-Populetum</i> (Tx. 1931) Meijer-Drees 1936:</b>	
<i>Agrostis stolonifera</i> L.	+ · · + 1 · 1 + · · 1 + · <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2 3 2</span> · 1 · 2
<i>Populus nigra</i> L.	+ · · 1 · + · · + · · + · <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">+ 1 1</span> 4 4 4 5
<b>Діагностичні та характерні види асоціації <i>Populetum nigro-albae</i> Slavnić 1952:</b>	
<i>Populus alba</i> L.	+ · · 1 · + · · + · · + · 4 4 4 <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">4 4 4 3</span>
<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.	1 2 2 + 1 + 2 + 2 · 1 + 1 + 1 1 <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">3 2 + 2</span>
<b>Діагностичні та характерні види союзу <i>Salicion albae</i> Soó 1951 та порядку <i>Salicetalia purpureae</i> Moor 1958:</b>	
<i>Galium aparine</i> L.	· 1 · + · 1 + 1 + + · + · · · · + · +
<i>Humulus lupulus</i> L.	1 + 1 + 1 · + 1 1 1 · · · + · + · · + ·
<i>Ranunculus repens</i> L.	· · + · · + · · + · · · + · · · + · · ·
<i>Rubus caesius</i> L.	2 1 · 1 · 1 + · 1 1 · 1 + · + · 2 + · ·
<i>Salix alba</i> L.	5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 4 4 · + + ·
<i>Solanum dulcamara</i> L.	· + · · + + · · · + · · 1 + + · + · +
<i>Urtica dioica</i> L.	2 + + 1 2 2 + 2 + + 5 4 · 3 2 2 1 3 2 +
<b>Діагностичні та характерні види класу <i>Salicetalia purpureae</i> Moor 1958:</b>	
<i>Amorpha fruticosa</i> L.	+ + · + + 1 · + · + · · · · + · · 1 ·
<i>Calystegia sepium</i> (L.) R.Br.	· 1 · · + 1 + · 1 · · + · + · · + + ·
<i>Salix fragilis</i> L.	· 1 · + 1 1 · + + · · · · 1 · · · ·
<i>Salix purpurea</i> L.	+ + · · · + + · · · + · · · · · · ·
<i>Salix triandra</i> L.	· · + + + · · + + · · · + · · · · + 1
<i>Salix viminalis</i> L.	· · · 2 1 1 · + + · · 1 · + · · · + +
<i>Symphytum officinale</i> L.	· + · · + · 1 · · 1 · + · · 1 · 2 · · ·
<b>Інші види:</b>	
<i>Acorus calamus</i> L.	· + + · · + + · · · · + + · · · ·
<i>Angelica archangelica</i> L.	· · · + · + · · · · · · + · · · ·



<i>Anthriscus sylvestris</i> (L.) Hoffm.	·	+	·	·	·	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·		
<i>Beckmannia eruciformis</i> (L.) Host	+	·	·	·	·	·	+	·	·	·	·	·	·	+	·	·	·	·	+	·	
<i>Bidens frondosa</i> L.	+	+	·	·	+	·	+	·	+	·	+	·	·	·	·	1	·	·	+		
<i>Bidens tripartita</i> L.																					
<i>Calamagrostis epigeios</i> (L.) Roth	1	+	2	1	1	+	2	1	1	+	·	·	·	·	·	·	·	·	+	·	1
<i>Caltha palustris</i> L.	·	·	·	·	+	·	·	·	·	·	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
<i>Carex acutiformis</i> Ehrh.	2	+	2	+	1	·	+	2	1	2	·	·	·	·	+	1	+	·	1	+	2
<i>Dactylis glomerata</i> L.	·	·	+	·	·	·	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
<i>Echinocistis lobata</i> (Mich.) Torr. et. A. Gray	·	·	·	+	·	·	·	+	·	·	·	·	·	·	+	+	·	·	·	·	·
<i>Echinocystis lobata</i> Torr. & A.Gray	+	+	·	+	·	+	·	·	1	·	·	+	+	·	·	+	·	·	·	·	·
<i>Elymus repens</i> (L.) Gould	·	+	+	1	·	·	1	+	·	·	·	·	·	·	·	1	·	·	+	·	·
<i>Equisetum hyemale</i> L.	·	+	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
<i>Eupatorium cannabinum</i> L.	·	·	·	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
<i>Filipendula ulmaria</i> (L.) Maxim.	·	·	·	·	+	·	·	·	·	·	·	+	·	·	·	·	·	·	+	·	·
<i>Geum urbanum</i> L.	·	·	+	·	·	+	·	+	·	·	·	·	·	+	·	·	·	·	·	·	·
<i>Glechoma hederacea</i> L.	·	·	·	1	·	·	·	1	+	1	·	·	·	·	1	+	·	1	1	·	·
<i>Glyceria maxima</i> (C. Hartm.) Holmb.	·	·	·	+	·	·	·	·	·	·	·	·	+	+	·	·	·	·	·	+	+
<i>Hylocomium splendens</i> (Hedw.) Schimp.	·	·	·	+	·	·	·	+	·	·	·	·	·	·	+	·	·	+	+	·	·
<i>Iris pseudoacorus</i> L.	·	+	·	·	·	·	·	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·	+	·	·	·
<i>Lycopus europaeus</i> L.	·	·	·	·	·	·	·	+	·	·	·	·	·	·	+	+	·	·	·	·	·
<i>Lysimachia nummularia</i> L.	+	·	·	·	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
<i>Lysimachia vulgaris</i> L.	·	+	·	·	·	·	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
<i>Lythrum salicaria</i> L.	·	·	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·	+	+	·	·	·	·	·	+	+
<i>Mentha aquatica</i> L.	+	·	·	·	·	·	+	·	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
<i>Oenanthe aquatica</i> (L.) Poir.	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	+	·	·	·	·	·	·
<i>Ranunculus repens</i> L.	·	+	+	·	·	1	·	·	·	·	·	·	·	·	1	·	1	1	·	1	·
<i>Rumex hydrolapatum</i> Huds	·	·	·	·	·	+	·	·	·	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
<i>Sagittaria sagittifolia</i> L.	·	·	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	1	·	·	·	·
<i>Sambucus nigra</i> L.	·	·	·	+	+	·	+	·	·	·	·	+	+	·	·	·	·	·	+	·	·
<i>Sium latifolium</i> L.	·	+	·	·	+	+	·	·	·	·	+	+	·	·	·	·	·	+	+	·	·
<i>Symphytum officinale</i> L.	·	·	·	·	+	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·	+	·	·	·	·	·
<i>Taraxacum laceratum</i> (Brenner) Brenner	·	·	+	·	·	·	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	+
<i>Thelypteris palustris</i> Schott	+	2	1	2	+	2	2	·	1	+	·	+	2	·	1	·	1	2	·	2	·
<i>Typha latifolia</i> L.	·	·	·	+	·	·	·	·	·	·	·	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·
<i>Valeriana officinalis</i> L.	·	·	+	·	·	·	·	+	·	·	·	+	+	·	·	·	·	·	·	+	+

**Синтаксони:** 1 – *Salicetum albae*, 2 – *Poo nemoralis-Salicetum albae*, 3 – *Salici-Populetum*, 4 – *Populetum nigro-albae*.

**Місця та дати описів угруповань:**

1. Заплава р. Десна, біля с. Боромики, Чернігівський р-н. 15.09.2023 р.;
2. Заплава р. Снов, околиці с. Снов'янка, Чернігівський р-н. 07.07.2023 р.;
3. Заплава р. Снов, неподалік с. Седнів, Чернігівський р-н. 09.09.2024 р.;

4. Заплава р. Снов, біля с. Нові Млини, Корюківський р-н. 20.06.2020 р.;
5. Заплава р. Снов, околиці м. Сновськ, Корюківський р-н. 08.07.2021 р.;
6. Заплава р. Снов, біля с. Старі Боровичи, Корюківський р-н. 25.06.2019 р.;
7. Заплава р. Снов, біля с. Загребельна Слобода, Корюківський р-н. 09.08.2021 р.;
8. Заплава р. Снов, біля с. Гірськ, Корюківський р-н. 07.08.2021 р.;
9. Заплава р. Ревна, околиці м. Семенівка, Новгород-Сіверський р-н. 26.09.2021 р.;
10. Заплава р. Снов, біля с. Снов'янка, Чернігівський р-н. 07.07.2023 р.;
11. Заплава р. Снов, за с. Бігач, Чернігівський р-н. 23.09.2023 р.;
12. Заплава р. Снов, с. Седнів, Чернігівський р-н. 09.09.2024 р.;
13. Заплава р. Снов, біля с. Гірськ, Корюківський р-н. 07.08.2021 р.;
14. Заплава р. Десна, біля с. Боромики, 15.09.2023 р.;
15. Заплава р. Снов, біля с. Малий Дирчин, Чернігівський р-н. 09.09.2024 р.;
16. Заплава р. Снов, неподалік с. Нові Боровичи, Корюківський р-н. 20.06.2020 р.;
17. Заплава р. Снов, біля с. Малий Дирчин, Чернігівський р-н. 09.09.2024 р.;
18. Заплава р. Снов, біля с. Нові Боровичи, Корюківський р-н. 05.08.2020 р.;
19. Заплава р. Ревна, околиці с. Залізний Міст, Новгород-Сіверський р-н. 28.09.2021 р.;
20. Заплава р. Ревна, м. Семенівка, Новгород-Сіверський р-н. 26.09.2021 р.

**Автори описів:** Асмаковський Є. В., Карпенко Ю. О.

Клас *Alnetea glutinosae* включає низинні евтрофні й мезоевтрофні заболочені або обводнені вільшняки на торф'янистих ґрунтах. Клас представлений порядком *Alnetalia glutinosae* (Dubyna et al., 2019). Діагностичні та характерні види: *Dryopteris carthusiana* (Vill.) Н.Р. Fuchs, *Dryopteris cristata* (L.) A.Gray, *Frangula alnus* Mill., *Galium elongatum* C.Presl, *Salix pentandra* L. (табл. 2).

Порядок *Alnetalia glutinosae* включає угруповання евтрофних і мезоевтрофних чорновільхових лісових боліт. Порядок представлений союзом *Alnion glutinosae* який включає угруповання чорновільхових лісових боліт притерасної частини заплав річок з мулистоторф'янистими ґрунтами з недостатньою аерацією, який представлений 6 асоціаціями *Ribo nigri-Alnetum*, *Carici acutiformis-Alnetum*, *Carici elongatae-Alnetum*, *Angelico sylvestri-Alnetum*, *Urtico dioicae-Alnetum glutinosae*, *Carici elatae-Alnetum glutinosae* (Dubyna et al., 2019). Діагностичні та характерні види: *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., *Athyrium filix-femina* (L.) Roth, *Archangelica officinalis* Hoffm., *Filipendula denudata* (J.Presl & C.Presl) Fritsch, *Geum rivale* Bigelow, *Hypnum cupressiforme* Hedw., *Myosoton aquaticum* Moench, *Solanum dulcamara* L. (табл. 2).

Асоціація *Ribo nigri-Alnetum* (табл. 2, описи 1–5). Угруповання асоціації формуються на знижених ділянках притерасної частини заплав річок на торф'янистих ґрунтах (Dubyna et al., 2019). Всього асоціація налічує до 58 видів. Середня видова насиченість становить 25–29 видів. Деревостан сформований за участі *Alnus glutinosa*. Висота деревного ярусу – 17–20 м, зімкненість крон –

60–80 %. Чагарниковий ярус угруповань сформований *Frangula alnus*, *Ribes nigrum* L., *Rubus caesius* *Salix cinerea* Willd., *Sambucus nigra* зі зімкненістю на рівні 20–30 %. Трав'яний ярус угруповань формується такими видами: *Caltha palustris* L., *Humulus lupulus*, *Padus avium* Mill., *Urtica dioica*, *Naumburgia thyrsoflora* (L.) Rchb. та іншими видами з загальним проєктивним покриттям в 60–80 %. Моховий ярус відсутній, спорадично присутній *Hypnum cupressiforme* (до 5 %). У деяких ценозах було виявлено регіонально-рідкісний вид *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn. Угруповання були відмічені в заплаві р. Десна біля заповідного урочища «Луциків гай», заплаві р. Снов біля с. Бігач, с. Гориця та Боромики та у кв. 30 Березнянського лісництва філії «Чернігівське лісове господарство» ДП «Ліси України» Чернігівського р-ну. Діагностичні та характерні види: *Caltha palustris*, *Humulus lupulus*, *Padus avium*, *Ribes nigrum* *Salix cinerea* (табл. 2).

Асоціація *Carici acutiformis-Alnetum* (табл. 2, описи 6–10). Угруповання асоціації формуються на притерасних зниженнях заплав річок на вологих мулистоторф'янистих і болотних ґрунтах з ґрунтовим підтопленням (Dubyna et al., 2019). Всього асоціація налічує до 38 видів. Середня видова насиченість становить 10–22 види. Деревостан сформований за участі *Alnus glutinosa*. Висота деревного ярусу – 17–22 м, зімкненість крон – 60–80 %. Чагарниковий ярус угруповань сформований *Frangula alnus* та *Salix pentandra* зі зімкненістю на рівні 10–20 %. Трав'яний ярус угруповань сформований угруповань за участі *Aegopodium*

*podagraria*, *Carex acutiformis*, *Galium aparine*, *Naumburgia thyrsoflora*, *Urtica dioica* та інших видів з загальним проєктивним покриттям в 60–80 %. У деяких ценозах було відмічено наявність регіонально-рідкісного *Hottonia palustris* L. Угрупування були відмічені в заплаві р. Десна біля с. Боромики, р. Снов біля с. Бігач та ботанічного заказника «Малієво» Чернігівського р-ну; на околиці с. Лосева Слобода та у кв. 38 Щорського лісництва філії «Корюківське лісове господарство» ДП «Ліси України» Корюківського р-ну. Діагностичні та характерні види: *Carex acutiformis*, *Naumburgia thyrsoflora* (табл. 2).

Асоціація *Carici elongatae-Alnetum* (табл. 2, описи 11–13). Угрупування асоціації формуються на евтрофних мокрих й сірих екоотопах з мулистого-торф'янистими ґрунтами незначної потужності, вираженим мікрорельєфом за рахунок утворення едіфікатором трав'янистого ярусу невеликих купин. У міжкупинних зниженнях у першій половині вегетаційного періоду застоюється вода (Dubyna et al., 2019). Всього асоціація налічує до 24 видів. Середня видова насиченість становить 10–12 видів. Деревостан сформований за участі *Alnus glutinosa*. Висота деревного ярусу – 17–20 м, зімкненість крон – 60–80 %. Чагарниковий ярус угруповань сформований *Frangula alnus* зі зімкненістю на рівні 10–20 %. Трав'яний ярус угруповань сформований за участі діагностичних та характерних видів, таких як *Carex elongata* L., *Cardamine dentata* Schult., *Geranium palustre* L. та низки інших видів з загальним проєктивним покриттям в 60–80 %. Угрупування були відмічені в заплаві р. Снов, біля Седнівської ГЕС (Чернігівський р-н); неподалік м. Сновськ та с. Хотуничі Корюківського р-ну (табл. 2).

Асоціація *Angelico sylvestri-Alnetum* (табл. 2, описи 14–17). Угрупування асоціації формуються на ділянках притерасної частини заплави річок з помірним або незначним підтопленням і торф'янистими ґрунтами (Dubyna et al., 2019). Всього асоціація налічує до 37 видів. Середня видова насиченість становить 15–17 видів. Деревостан сформований за участі *Alnus glutinosa*. Висота деревного ярусу – 15–20 м, зімкненість крон – 55–80 %. Чагарниковий ярус угруповань сформований *Frangula alnus* та *Rubus caesius* зі зімкненістю на рівні 10–20 %. Трав'яний ярус угруповань сформований за участі діагностичних та характерних – *Angelica sylvestris* L., *Galeopsis speciosa* Mill., *Glechoma hirsuta*, а також *Urtica dioica* і

*Thelypteris palustris* та інших з загальним проєктивним покриттям в 55–70 %. Угрупування були відмічені в заплаві р. Снов за с. Бігач, біля с. Гориця, Тупичів Чернігівського р-ну; біля ботанічного заказника загальнодержавного значення «Брецький» Корюківського р-ну (табл. 2).

Асоціація *Urtico dioicae-Alnetum glutinosae* (табл. 2, описи 18–30). Угрупування асоціації формуються на нітрифікованих порушених, періодично заливних заболочених ділянках заплави річок з болотними ґрунтами (Dubyna et al., 2019). Всього асоціація налічує до 66 видів. Середня видова насиченість становить 14–31 видів. Деревостан сформований за участі *Alnus glutinosa*. Висота деревного ярусу – 17–20 м, зімкненість крон – 60–80 %. Чагарниковий ярус угруповань сформований *Frangula alnus* та *Sambucus nigra* зі зімкненістю на рівні 10–20 %. Трав'яний ярус угруповань сформований за участі *Aegopodium podagraria*, *Galium aparine*, *Glechoma hederacea* L., *Glechoma hirsuta*, *Poa palustris* Hegetschw., *Urtica dioica*. та низки інших видів з загальним проєктивним покриттям в 60–80 %. Моховий ярус майже відсутній, присутність *Hypnum cupressiforme* не більше 5 %. У деяких ценозах було відмічено присутність регіонально-рідкісного виду *Equisetum hyemale* L. Угрупування були відмічені в заплаві р. Снов за с. Снов'янка, с. Седнів, с. Малий Дирчин та біля с. Моргуличі, Тупичів Чернігівського р-ну.; кв. 38 Щорського лісництва філії «Корюківське лісове господарство» ДП «Ліси України» та біля с. Лосева Слобода, Гірськ Корюківського р-ну; заплаві р. Ревна, с. Залізний Міст Новгород-Сіверського р-ну. Діагностичні та характерні види: *Aegopodium podagraria*, *Galium aparine*, *Glechoma hederacea*, *Poa palustris*, *Urtica dioica* (табл. 2).

Асоціація *Carici elata-Alnetum glutinosae* (табл. 2, описи 31–41). Угрупування асоціації формуються на знижених заболочених ділянках заплави річок, островів, берегів лиманів і водотоків з лучно-болотними та болотними ґрунтами (Dubyna et al., 2019). Всього асоціація налічує до 60 видів. Середня видова насиченість становить 17–25 видів. Деревостан сформований за участі *Alnus glutinosa*. Висота деревного ярусу – 15–20 м, зімкненість крон – 50–70 %. Чагарниковий ярус угруповань сформований *Frangula alnus* та *Rubus caesius* зі зімкненістю на рівні 10–30 %. Трав'яний ярус угруповань сформований за участі діагностичних та характер-



них видів – *Carex elata*, *Lycopus europaeus* L., *Aegopodium podagraria*, *Urtica dioica* та інших з загальним проективним покриттям в 60–80 %. Моховий ярус відсутній, спорадично присутній *Hypnum cupressiforme* (до 5 %) (табл. 2). Угруповання були відмічені в заплаві р. Снов біля с. Бігач та с. Моргуличі, ботанічного заказника «Малієво», с. Седнів та Тупичів Чернігівського р-ну.; кв. 80 Староруднянського лісництва філії «Городнянське лісове господарство» ДП «Ліси України», кв. 60, 75, 108 Новоборовицького лісництва філії «Корюківське лісове господарство» ДП «Ліси України» та на околицях с. Бреч Корюківського р-ну (табл. 2).

Згідно «Національного каталогу біотопів України» (Kuzemko et al., 2018) досліджувана заплавна лісова рослинність відноситься до лісових біотопів Д1.6 (евтрофні заплавні, сирі й вологі позазаплавні широколистяні ліси).

Вербово-тополеві угруповання басейну річки Снов відносяться до екотопу Д1.6.1 (заплавні вербові і тополеві ліси); G1.11 (Прирічкові вербові ліси) згідно Оселищної Резолюції 4 Бернської конвенції; №91E0 (заплавні ліси – *Salicion albae*) відповідно до Додатку I Оселищної Директиви. За шкалою репрезентативності та збереженості мають ступінь «А» та «В» відповідно. Синсо-

зологічний статус мають асоціації *Salicetum albae*, *Salici-Populetum*, *Populetum nigro-albae* та охороняються за Директивою Ради Європи 92/43/ЄЕС (№ 91E0, № 92A0) (Kuzemko et al., 2018; Dubyna et al., 2019).

Угруповання вільхових лісів території досліджень відносяться до екотопу Д1.6.4 (рівнинні незаболочені ліси з *Alnus glutinosa*); G1.21 (заплавні періодично мокрі ліси з домінуванням *Alnus glutinosa*) згідно Оселищної Резолюції 4 Бернської конвенції; №91E0 (заплавні ліси з *Alnus glutinosa*) відповідно до Додатку I Оселищної Директиви. За шкалою репрезентативності та збереженості мають ступінь «А» та «А» відповідно. Синсозологічного статусу досліджувані угруповання не мають, проте угруповання асоціації *Carici elongatae-Alnetum* потребують охорони, оскільки збереглися лише фрагментарно, мають багатий флористичний склад та які заборонені для осушення (Kuzemko et al., 2018; Dubyna et al., 2019).

Під час дослідження заплавної лісової рослинності нами були відмічені у її складі три созологічно-цінні види флори, серед них *Pteridium aquilinum* (рис. 2), *Hottonia palustris* (рис. 3), *Equisetum hyemale* (рис. 4), які мають регіонально рідкісний статус охорони у Чернігівській області (Karpenko & Asmakovskyi, 2024).



Рис. 2. *Pteridium aquilinum* на узліській частині асоціації *Ribo nigri-Alnetum* (табл. 2., опис 3)



Рис. 3. *Hottonia palustris* у складі асоціації *Carici acutiformis-Alnetum* (табл. 2., опис 7)

Таблиця 2

Фітоценотична характеристика угруповань  
класу *Alnetea glutinosae* Br.-Bl. et. Tx. ex Westhoff et al. 1946

Синтаксон, №	1					2					3					4					5										6														
Номер опису, №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41				
Площа опису, м <sup>2</sup>	200	200	300	250	200	200	300	200	200	200	200	200	200	300	250	200	200	200	250	300	250	300	200	300	300	200	250	200	250	250	200	250	200	200	300	200	200	250	200	250	250				
Зімкненість крон деревостану, %	60	70	70	80	70	70	70	70	60	70	70	60	65	70	70	60	70	60	80	70	70	50	70	70	50	60	70	65	60	65	70	70	50	70	70	50	60	70	65	60	65				
Зімкненість чагарникового ярусу, %	20	20	25	30	20	10	10	20	20	20	10	20	10	10	10	20	10	20	10	-	10	-	10	10	20	-	20	-	15	10	5	10	5	10	10	20	5	10	-	20	10				
Проективне покриття трав'яного ярусу, %	70	80	70	65	60	80	70	60	70	60	70	80	60	70	55	60	60	70	80	70	65	60	80	70	60	70	60	70	80	60	70	65	60	80	70	60	70	60	70	80	60				
Проективне покриття мохового ярусу, %	5	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	5	-	5	5	-	5	5	-	5	-	5	5	-	5	-	5	-	5	5	5	5	5				
Діагностичні та характерні види асоціації <i>Ribo nigri-Alnetum Solińska-Górnicka</i> (1975) 1987:																																													
<i>Caltha palustris</i> L.	2	3	2	3	1	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	2	·	·	
<i>Humulus lupulus</i> L.	3	3	2	2	3	·	·	1	·	1	·	·	·	+	·	·	·	·	·	+	·	·	·	·	·	·	·	·	1	1	·	+	1	·	·	·	+	1	·	·	·	·	+	·	
<i>Padus avium</i> Mill.	1	1	1	·	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·	1	·	·	·	+	1	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	
<i>Ribes nigrum</i> L.	1	1	2	2	1	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	+	·	·	1	·	·	·	·	1	·	·	·	1	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	1	+
<i>Salix cinerea</i> Willd.	1	2	1	+	1	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	+	·	·	·	·	·	1	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	
Діагностичні та характерні види асоціації <i>Carici acutiformis-Alnetum Scamoni</i> 1935:																																													
<i>Carex acutiformis</i> Brot.	·	·	+	1	·	4	5	4	5	5	·	·	·	1	·	·	·	·	1	·	·	·	·	·	+	2	·	·	1	·	·	·	+	2	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	
<i>Naumburgia thyrsiflora</i> (L.) Rchb.	·	1	1	+	+	2	1	2	+	2	·	·	·	·	·	·	·	·	·	+	1	·	·	·	·	·	1	1	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	



<i>Archangelica officinalis</i> Hoffm.	· · · · 1 · · · + · · · · · · + · 1 · · + · · + · · · · · · + · · · + · · · · + · · ·
<i>Filipendula denudata</i> (J.Presl & C.Presl) Fritsch	+ · + · · · · + 1 + · + + · + + · + + · · · · · 1 · · · · + 1 · + + + 1 · + + +
<i>Geum rivale</i> Bigelow	+ · 1 + · · + + · · · · · 1 · · · · · + + · + · · · · + + + + · · · · + + + · ·
<i>Hypnum cupressiforme</i> Hedw.	1 · 1 · · · · · · · · · · · · · · 1 · 1 · 1 1 · 1 1 · 1 · 1 1 · 1 · 1 · 1 1 + · 1
<i>Myosoton aquaticum</i> Moench	+ + · · · · · · · · · + · · 1 · · · · + · · · · · · · · · + · · · + · · · + · · · + ·
<i>Solanum dulcamara</i> L.	· 1 + · + · · · + · · + 1 + · · · · + + + · · · · + + · · · · 1 + · · + 1 · · · +
<b>Діагностичні та характерні види класу <i>Alnetea glutinosae</i> Br.-Bl. et. Tx. ex Westhoff et al. 1946:</b>	
<i>Dryopteris carthusiana</i> (Vill.) H.P.Fuchs	+ · · · · · · · + ·
<i>Dryopteris cristata</i> (L.) A.Gray	· · · · 1 · · + + · · · · · · · 2 · · + · · + · · · · · · + · · + · · + · · + · · + ·
<i>Frangula alnus</i> Mill.	2 1 1 2 1 2 1 2 2 1 1 1 1 2 2 3 2 2 2 · 1 · 1 2 2 · 2 · 2 + · 1 · 1 1 2 · 2 · 2 1
<i>Galium elongatum</i> C.Presl	· + · · · · · · + · · · · · · + · · · · ·
<i>Salix pentandra</i> L.	· + · · · · 1 1 1 2 · + · · · · · · + · + · · · · · · · · · · · · · · + · · · · · · · · · +
<b>Інші види:</b>	
<i>Achillea millefolium</i> L.	· · · · · + · · · · · · · · · · · · · · + · · · · · · · · · · · · · · + · · · + · · · · · · · · · · · ·
<i>Bidens tripartite</i> L.	· · · 1 + · + · · · · · · · · · · · · · · + · · · · · · · · · · · · · · + · · · · · · · · · · · ·
<i>Calamagrostis canescens</i> (Weber)Roth	· 1 + · · · · · · · · · 1 · · · · · · · · · · + · · · · · · · · · · · · · · + · · · · · · · · · ·
<i>Calystegia sepium</i> (L.) R.Br.	· · + + · · · · · · · · · · · · · · 1 · · · · · · · · + · · · · · · · · + · · · · · · · · + +
<i>Carex hirta</i> L.	· · · · · 1 · · · · · · · · · · 1 · · · · + ·
<i>Cucubalus baccifer</i> L.	· · + · · · · · + · + · · · · · · · · + · · · · · · ·
<i>Deschampsia caespitosa</i> P.Beauv.	· 1 · · + · · + · · · · · · · · · · · · + + · · · · · · · · · · · · + + · · · · + + · · · · · · ·
<i>Echinocystis lobata</i> (Michx.) Torr. & A.Gray	· · · + · · · + + · · 1 · · · + · · · · + + · · · · + + + · · · · · · · · · · · + · + + ·
<i>Equisetum fluviatile</i> L.	· + + + · · + · · + · · + · · · · · · · · · + + · · · · + · · · · · · · · + · · · · · · ·
<i>Equisetum hyemale</i> L.	· + · · · · · · · · · · · · · · · · · · · 2 2 · · · · · · · · · · · · · · + + + · · · · · · ·
<i>Eupatorium cannabinum</i> L.	· · + · · · · · · · · · · · · · · · · · · + + · · + · · · · · · + 1 + · · · · · · · · · · ·
<i>Geum urbanum</i> A.Gray	+ · · + · · · · · · · · · · · · · · + · · · · · · · · · · · · + · · + · · · · · + · · · · · ·
<i>Heracleum sibiricum</i> L.	· + · · + · · · · · · · · · · · · · · + · · · · · · · + · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
<i>Hottonia palustris</i> L.	· · · · · · 1 ·
<i>Impatiens glandulifera</i> Royle	· · 1 · · · · · · · · · · · · · · · · · + · · · · · · + · · + · · · · · · · · + · · · · · ·



<i>Impatiens noli-tangere</i> Michx.	· 1 · 1 + · + + · · · · · · · 1 · · · + · · + + · · · · · · + + · · · · · · + +
<i>Inula britannica</i> L.	· · · · · · · + + · · · + + ·
<i>Iris pseudacorus</i> L.	· · · · · · · · · · · · · · · · · 1 + + + · · · · + 1 + + + 1 · · · · · · + + · · · · ·
<i>Lylhrum salicaria</i> L.	· · · + + + · · · · · · · + 1 · · · · · · · + + · · · · · · · + · · · · · · + · · · · ·
<i>Mentha aquatica</i> L.	· · · · · · · + + · · · · · · · + + · · · · · + · · + · · · · · · · · · · · · · · ·
<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.	· + · + · · · + · + · · + · · + · · · · · + 1 + + · · · · · + 1 · + + · · 1 + · ·
<i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn	· · 3 ·
<i>Ranunculus acris</i> L.	+ + · · + · · · · · · · · · · · 1 · · + · · · · · · · · · + · · + · · · + + · · · +
<i>Ranunculus repens</i> L.	+ · + 1 · · · · + + · + + · · · · · · · + · · · · · · · · · · · + + · · · · · + ·
<i>Ranunculus sceleratus</i> L.	· · · + · · · · · · · · · · + · · · · · · · + · · · · · + + + · · · · · · · · · · · · · ·
<i>Rubus caesius</i> Thunb. ex Maxim.	1 + · + · · · + + · + · · + 1 + + · · · · · · · · · + · · 2 + 2 1 2 + 1 · 2 1
<i>Rumex hydrolapathum</i> (Scop.) F.H.Wigg.	· · · + · · · · · + + · · · · · · 1 + + + · · · · · · · + · · + + · · + · · +
<i>Salix alba</i> L.	· + · + · · · · · · · · · · · · · · · · · + + · · · · · · · + · · · · · · · · · ·
<i>Sambucus nigra</i> L.	· 1 · + + · · · · · · · · · · 2 · · · · 1 · 1 · · · 2 + · · · + · · · · · · · ·
<i>Scrophularia nodosa</i> L.	· + + · + · · + + · + · · + · · · · · + · · · · 1 1 · · · · · + · · · · · + ·
<i>Sium latifolium</i> L.	· · · · · · · · · · · · · · · · · + · · + · · · · · · · · · · · · · · + + · · · · ·
<i>Taraxacum officinale</i> F.H.Wigg.	+ · · + · · · · · · · · · · + · · + · · · · · · · · · + · · · + + · · · · · + · +
<i>Thelypteris palustris</i> Schott	· + · · 3 · · + · · 2 · · 1 · · 2 · · · + · 2 · · · · · + · · · · · + · · · · ·
<i>Typha angustifolia</i> L.	· · · + · · · · · · · · · · · + + · · · · · · · · · · · + + · · · · · + · ·
<i>Typha latifolia</i> L.	· · + + · · · + + · · · · · · · + + · · · · · + 1 + + · · · · · + + · ·
<i>Ulmus laevis</i> Pall.	· · · · · · + · · · · · · · · 1 ·
<i>Urtica galeopsifolia</i> Wierzb. ex Opiz.	· + + + · · · · ·

**Синтаксони:** 1 – *Ribo nigri-Alnetum*, 2 – *Carici acutiformis-Alnetum*, 3 – *Carici elongatae-Alnetum*,  
4 – *Angelico sylvestri-Alnetum*, 5 – *Urtico dioicae-Alnetum glutinosae*, 6 – *Carici elatae-Alnetum glutinosae*.

**Місця та дати описів угруповань:**

1. Заплава р. Десна, неподалік заповідного урочища «Луциків гай», Чернігівський р-н. Дата: 15.09.2023 р.;
2. Заплава р. Снов, біля с. Бігач, Чернігівський р-н. 23.09.2023 р.;
3. Вільховий ліс в яру біля ЛЕП, Чернігівський р-н. 15.09.2023 р.;
4. кв. 30 Березнянського лісництва філії «Чернігівське лісове господарство» ДП «Ліси України»; околиці с. Моргуличі, Чернігівський р-н. 23.09.2023 р.;
5. Заплава р. Снов, біля с. Бігач, Чернігівський р-н. 06.10.2023 р.;
6. Вільховий ліс, околиці с. Лосева Слобода, Корюківський р-н. 04.08.2019 р.;

7. Вільховий ліс на околицях с. Моргуличі обабіч ґрунтової дороги, біля переправи через природний струмок. Чернігівський р-н. 23.09.2023 р.;
8. Заплава р. Снов, біля с. Бігач, Чернігівський р-н. 23.09.2023 р.;
9. Заболочена частина гідрологічного об'єкта біля ботанічного заказника «Малієво», Чернігівський р-н. 06.10.2023 р.;
10. кв. 38 Щорського лісництва філії «Корюківське лісове господарство» ДП «Ліси України»; біля с. Нові Млини, Корюківський р-н. 20.06.2020 р.;
11. Заплава р. Снов, біля с. Великий Дирчин, Чернігівський р-н. 09.09.2024 р.;
12. Заплава р. Снов, біля Седнівської ГЕС, Чернігівський р-н. 15.05.2019 р.;
13. Вільховий ліс, біля автомобільної дороги, неподалік с. Хотуничі, Корюківський р-н. 18.10.2024 р.;
14. Вільховий ліс на околицях міста Сновськ, Корюківський р-н. 18.10.2024 р.;
15. Вільховий ліс на околицях с. Гориця, Чернігівський р-н. 15.09.2023 р.;
16. Заплава р. Снов за с. Бігач, Чернігівський р-н. 23.09.2023 р.;
17. Вільховий ліс біля с. Тупичів, Чернігівський р-н. 09.09.2024 р.;
18. Вільховий ліс біля ботанічного заказника загальнодержавного значення «Брецький», Корюківський р-н. 18.10.2024р.;
19. Заплава р. Снов за с. Снов'янка, Чернігівський р-н. 07.07.2023р.;
20. Заплава р. Снов за с. Снов'янка, Чернігівський р-н. 07.07.2023р.;
21. Вільховий ліс в штучному яру біля с. Моргуличі, Чернігівський р-н. 23.09.2023 р.;
22. Вільховий ліс на околицях с. Моргуличі біля ґрунтової дороги, Чернігівський р-н. 23.09.2023 р.;
23. Вільховий ліс на околицях с. Моргуличі. Чернігівський р-н. 06.10.2023 р.;
24. Заплава р. Снов м. Седнів, Чернігівський р-н. 09.09.2024 р.;
25. Вільховий ліс біля с. Тупичів. Чернігівський р-н. 09.09.2024 р.;
26. Вільховий ліс біля с. Лосева Слобода, Корюківський р-н. 04.08.2019 р.;
27. кв. 38 Щорського лісництва філії «Корюківське лісове господарство» ДП «Ліси України»; біля с. Нові Млини, Корюківський р-н. 20.06.2020 р.;
28. Заплава р. Снов біля с. Малий Дирчин, Чернігівський р-н. 09.09.2024 р.;
29. Заплава р. Снов біля с. Гірськ, Корюківський р-н. 07.08.2021 р.;
30. Заплава р. Ревна, околиці с. Залізний Міст, Новгород-Сіверський р-н. 28.09.2021 р.;
31. Вільховий ліс на околицях с. Моргуличі біля ґрунтової дороги, Чернігівський р-н. 23.09.2023 р.;
32. Заплава р. Снов біля с. Бігач в напрямку р. Снов, Чернігівський р-н. 23.09.2023 р.;
33. Вільховий ліс на околицях с. Моргуличі. Чернігівський р-н. 06.10.2023 р.;
34. Вільховий ліс біля ботанічного заказника «Малієво». Чернігівський р-н. 06.10.2023 р.;
35. Вільховий ліс с. Седнів. Чернігівський р-н. 09.09.2024 р.;
36. Вільховий ліс біля с. Тупичів. Чернігівський р-н. 09.09.2024 р.;
37. кв. 80 Староруднянського лісництва філії «Городнянське лісове господарство» ДП «Ліси України»; біля с. Смяч, Корюківський р-н. 09.08.2021 р.;
38. Вільховий ліс біля водойми, околиці с. Бреч, Корюківський р-н. 18.10.2024 р.;
39. кв. 60 Новоборовицького лісництва філії «Корюківське лісове господарство» ДП «Ліси України, Корюківський р-н. 09.08.2021 р.;
40. кв. 75 Новоборовицького лісництва філії «Корюківське лісове господарство» ДП «Ліси України, Корюківський р-н. 09.08.2021 р.;
41. кв. 108 Новоборовицького лісництва філії «Корюківське лісове господарство» ДП «Ліси України; біля с. Нові Боровичи, Корюківський р-н. 05.08.2020 р.

**Автори описів:** Асмаковський Є. В., Карпенко Ю. О.



Рис. 4. *Equisetum hyemale* у складі асоціації *Urtico dioicae-Alnetum glutinosae* (табл. 2., опис 20, 21)

### Висновки

Заплавні лісові екосистеми басейну річки Снов визначається переважно едафічними та гідрологічними чинниками, які обумовлюють формування угруповань вільхових та вербово-тополевих лісів, що належать до двох класів лісової рослинності: клас *Salicetea Purpureae* (порядок *Salicetalia purpureae*, союз *Salicion albae*, що представлений чотирма асоціаціями *Salicetum albae*, *Poo nemoralis-Salicetum albae*, *Salici-Populetum*, *Populetum nigro-albae* та класу *Alnetea Glutinosae* (порядок *Alnetalia glutinosae*, союз *Alnion glutinosae*, що представлений шістьма асоціаціями *Ribo nigri-Alnetum*, *Carici acutiformis-Alnetum*, *Carici elongatae-Alnetum*, *Angelico sylvestri-*

*Alnetum*, *Urtico dioicae-Alnetum glutinosae*, *Carici elatae-Alnetum glutinosae*. Досліджувана заплавна лісова рослинність відноситься до лісових біотопів Д1.6. Синзологічний статус мають асоціації *Salicetum albae*, *Salici-Populetum*, *Populetum nigro-albae* класу *Salicetea purpureae* та охороняються за Директивою Ради Європи 92/43/ЄЕС. Угруповання з класу *Alnetea glutinosae* охоронного статусу не мають, проте асоціації *Carici elongatae-Alnetum* потребують охорони. Раритетна компонента флористичного ядра асоціацій представлена трьома видами, серед них *Equisetum hyemale*, *Pteridium aquilinum*, *Hottonia palustris*, які мають регіональний статус охорони у Чернігівській області.

### 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.

**References**

- Andrienko, T. L. (Ed.). (2006). *Phytodiversity of the Ukrainian Polissia and its protection*. Phytosociocenter. (in Ukrainian)  
Фіторізноманіття Українського Полісся та його охорона. / за заг. ред. Т. Л. Андрієнко. Київ: Фітосоціоцентр, 2006. 316 с.
- Dubyna, D. V., Dziuba, T. P., Yemelianova, S. M., Bahrikova, N. O., Borysova, O. V., Borsukevych, L. M., Vynokurov, D. S., Hapon, S. V., Hapon, Yu. V., Davydov, D. A., Dvoretzkyi, T. V., Didukh, Ya. P., Zhmud, O. I., Kozyr, M. S., Konishchuk, V. V., Kuzemko, A. A., Pashkevych, N. A., Ryff, L. E., Solomakha, V. A., Felbaba-Klushyna, L. M., Fitsailo, T. V., Chorna, H. A., Chornei, I. I., Sheliah-Sosonko, Yu. R., & Yakushenko, D. M. (2019). *Prodrome of the vegetation of Ukraine*. Naukova dumka. (in Ukrainian)  
Дубина, Д. В., Дзюба, Т. П., Ємельянова, С. М., Багрикова та інші. Продромус рослинності України. Київ: Наукова думка, 2019. 782 с.
- Lukash, O. V., Sapiehin, L. M., Kyriienko, S. V., Daineko, M. M., Lukash, I. M., & Tymofieiev, S. F. (2012). *Bulletin of the Dnipropetrovsk State Agrarian University*, (1), 121–126. (in Ukrainian)  
Лукаш О. В., Сапегін Л. М., Кириєнко С. В., Дайнеко М. М. та інші. Стан прибережно-водних екосистем на рекультивованих примостових ділянках Чернігівської і Гомельської областей у прикордонній смузі з Брянською областю. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету*. 2012. № 1. С. 121–126.
- Lukash, O. V. (2008). *The flora of the Eastern Polesie vascular plants: the history of the study, conspectus*. Phytosociocenter. (in Ukrainian)  
Лукаш О. В. Флора судинних рослин Східного Полісся: історія дослідження, конспект. Київ: Фітосоціоцентр, 2008. 436 с.
- Karpenko, Yu. O. (2010). Ecological, floristic, and coenotic features of floodplain alder forests of the East Polissia District. *The scientific journal of Lesya Ukrainka Volyn National University*, (9), 28–31. (in Ukrainian)  
Карпенко Ю. О. Екологічні, флористичні та ценотичні особливості заплавної чорновільшняків Східнополіського округу. *Науковий вісник Волинського національного університету імені Лесі Українки*. 2010. №9. С. 28 – 31.
- Karpenko, Yu. O., & Bilous, O. M. (2012). The network of forest nature reserve territories of the Snov river basin, role in conservation of phytodiversity of Chernihiv Polissia and approaches to optimization. *The nature of Western Polissia and adjacent territories*, (9), 146–151. (in Ukrainian)  
Карпенко Ю. О., Білоус О. М. Мережа лісових природно – заповідних територій басейну річки Снов, її роль у збереженні фіторізноманіття Чернігівського Полісся та підходи до оптимізації. *Природа Західного Полісся та прилеглих територій*. 2012. №9. С. 146 – 151.
- Karpenko, Yu. O., & Asmakovskyi, Y. V. (2024). The floristic characteristics, cenotic structure and ecological value alder forests of the lower part Snov river basin. *State and biodiversity of the ecosystems of the Shatsk National Nature Park and other protected areas: materials of the XX All-Ukrainian Scientific Conference (Lviv - Shatsk - Vorokhta, September 5–8, 2024)*, pp. 69–71. (in Ukrainian)  
Карпенко Ю., Асмаковський Є. Флористичні особливості, ценотична структура й екологічна цінність чорновільшняків пониззя басейну річки Снов. *Стан і біорізноманіття екосистем Шацького національного природного парку та інших природоохоронних територій: матеріали XX Всеукраїнської наукової конференції (м. Львів – смт Шацьк – смт Ворохта, 5–8 вересня 2024 р.)*. Львів: СПОЛОМ, 2024. С. 69–71.



Kuzemko, A. A., Didukh, Y. P., Onyshchenko, V. A., & Sheffer, Y. (Eds.). (2018). *National catalog of biotops of Ukraine*. FOP Klymenko Yu. Ya. (In Ukrainian)

Національний каталог біотопів України / за ред. А.А. Куземко, Я.П. Дідуха, В.А. Онищенко, Я. Шеффера. Київ: ФОР Климченко Ю.Я., 2018. 442 с.

QGIS (n.d.). Spatial visualization and decision-making tools for everyone. Retrieved February 07, 2025, from <https://qgis.org/>

Rudenko, L. H. (Ed.). (2007). *National atlas of Ukraine*. DNVP «Kartohrafiia». (in Ukrainian)

Національний атлас України. / ред. Л. Г. Руденко. Київ: ДНВП «Картографія», 2007. 435 с.

Yakovenko, O. I. (2023). Geoinformational analysis of the Chernihiv Polesie loess «islands» forest vegetation changes. *Biota. Human. Technology*, (2), 31–40. <https://doi.org/10.58407/bht.2.23.3> (In Ukrainian)

Яковенко О. І. Геоінформаційний аналіз змін лісової рослинності лесових «островів» Чернігівського Полісся. *Biota. Human. Technology*. Чернігів: НУЧК ім. Т.Г.Шевченка, 2023. №2, С. 31–40. <https://doi.org/10.58407/bht.2.23.3>

Yakovenko, O. I. (2024). The forest vegetation of the Chernihiv Polesie loess «islands». *Biota. Human. Technology*, (3), 34–59. <https://doi.org/10.58407/bht.3.23.3> (In Ukrainian)

Яковенко О. І. Лісова рослинність лесових «островів» Чернігівського Полісся. *Biota. Human. Technology*. 2024. №3. С. 34–59. <https://doi.org/10.58407/bht.3.23.3>

Yakubenko, B. E., Popovych, S., Yu., Ustymenko, P. M., Dubyna, D. V., Churilov, A. M. (2018). *Geobotany: methodological aspects of research: textbook*. Lira K. (in Ukrainian)

Якубенко Б. Є., Попович С. Ю., Устименко П. М., Дубина Д. В., Чурилов А. М. Геоботаніка: методичні аспекти досліджень. навчальний посібник. Київ: Лира К, 2018. 316 с.

WFO (2025). Plant List. In *World Flora Online. Version 2025.01*. Retrieved January 28, 2025, from <https://wfoplantlist.org/plant-list>

WWF Ukraine (2025). Conservation and management of floodplain forests. In *Nature-based solutions / NBS*. Retrieved January 23, 2025, from <https://nbs.wwf.ua/methodology/zberezhennia-ta-menedzhment-zaplavnykh-lisiv/> (in Ukrainian)

Збереження та менеджмент заплавних лісів. WWF Ukraine. Природоорієнтовані рішення (Nature-based solutions / NBS). URL: <https://nbs.wwf.ua/methodology/zberezhennia-ta-menedzhment-zaplavnykh-lisiv/> (дата звернення: 23.01.2025).

**Received:** 25.02.2025. **Accepted:** 10.03.2025. **Published:** 03.04.2025.

**Ви можете цитувати цю статтю так:**

Асмаковський Є. Синтаксономія заплавних лісів басейну річки Снов. *Biota. Human. Technology*. 2025. №1. С. 10-27.

**Cite this article in APA style as:**

Asmakovskyi, Ye. (2025). The syntaxonomy of floodplain forests of the Snov river basin. *Biota. Human. Technology*, 1, P. 10-27. (in Ukrainian)

**Information about the author:**

**Asmakovskyi Ye.** [in Ukrainian: **Асмаковський Є.**], Postgraduate student, E-mail: zhekasmakovsk1y@gmail.com  
ORCID: 0000-0001-7134-0545

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



Copyright (c) 2025 Volodymyr Fedenko

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

Володимир Феденко

**СВІТЛОПОГЛИНАЛЬНА ЗДАТНІСТЬ КВІТОК ІНВАЗІЙНОГО ВИДУ  
AMBROSIA ARTEMISIIFOLIA L.**

Volodymyr Fedenko

**LIGHT ABSORPTION CAPACITY OF FLOWERS OF THE INVASIVE SPECIES  
AMBROSIA ARTEMISIIFOLIA L.****АНОТАЦІЯ**

**Мета роботи.** Встановлення світлопоглинальної здатності квіток амброзії полинолистої.

**Методологія.** Відбір чоловічих квіток проводили на стадії цвітіння у верхній частині крони рослин, де рослини отримують максимальну кількість світла і цей процес відбувається найінтенсивніше. Спектри відбиття отримували в діапазоні 350–800 нм. Колориметричні параметри визначали в системах CIE XYZ та CIE  $L^*a^*b^*$ . Для додаткової ідентифікації флавоноїдів проводили екстракцію квіток ізопропанолом та хемосорбцію сполук із екстракту на поверхні оксиду алюмінію із наступним визначенням спектральних характеристик.

**Наукова новизна.** Вперше визначено відбивальні та колориметричні характеристики для підтвердження фотозахисного ефекту УФ-поглинальних флавоноїдів у квітках амброзії полинолистої.

**Висновки.** Визначальною особливістю спектрів відбиття квіток інвазійного виду *Ambrosia artemisiifolia* як геліофіту є підвищення інтенсивності максимуму УФ-поглинальних флавоноїдів порівняно із каротиноїдами та хлорофілами. Для збільшення ступеня розподілення виявлених максимумів проведено диференціювання спектральної кривої відбиття. Підвищена локалізація флавоноїдів у поверхневих тканинах квіток обумовлює збільшення фотопротекторної здатності як адаптивне підсилення репродуктивної системи інвазійного виду. Відбивальні характеристики квіток обумовили стимул із домінують довжиною хвилі у діапазоні жовтого кольору. Флавоноїди ідентифіковані завдяки хелатувальним властивостям шляхом хемосорбції із рослинного екстракту на оксиді алюмінію. У результаті сорбційної взаємодії отримано адсорбат жовто-зеленого кольору. Наявність флавоноїдів у адсорбаті підтверджена спектральними характеристиками. Отримані результати підтверджують роль фенольних сполук у підвищенні конкурентоспроможності інвазійних рослин згідно гіпотези зміни захисту (shifting defence hypothesis). Запропоновані методичні підходи можуть бути застосовані для ідентифікації інвазійних видів на стадії цвітіння та при використанні ресурсного потенціалу цих рослин для отримання біологічно активних речовин.

**Ключові слова:** амброзія полинолиста, УФ-поглинальні флавоноїди, фотозахисний ефект, відбивальні та колориметричні характеристики

**ABSTRACT**

**The purpose of the work.** Determining the light absorption capacity of common ragweed flowers.

**Methodology.** The selection of male flowers was carried out at the flowering stage in the upper part of the plant crown, where the plants receive the maximum amount of light and this process occurs most intensively. Reflectance spectra were obtained in the range of 350–800 nm. Colorimetric parameters were determined in the CIE XYZ and CIE  $L^*a^*b^*$  systems. For additional identification of flavonoids, flowers were extracted with isopropanol and chemisorption of compounds from the extract on the surface of aluminum oxide was performed with subsequent determination of spectral characteristics.

**Scientific novelty.** Reflectance and colorimetric characteristics determined for the first time to confirm the photoprotective effect of UV-absorbing flavonoids in common ragweed flowers.

**Conclusions.** A defining feature of the reflectance spectra of flowers of the invasive species *Ambrosia artemisiifolia* as a heliophyte is an increase in the intensity of the maximum of UV-absorbing flavonoids compared to carotenoids and chlorophylls. To increase the degree of distribution of the detected maxima, the spectral reflectance curve was

differentiated. The reflectance characteristics of the flowers resulted in a stimulus with a dominant wavelength in the yellow range. The increased localization of flavonoids in the surface tissues of flowers causes an increase in the photoprotective ability as an adaptive enhancement of the reproductive system of the invasive species. Flavonoids were identified due to their chelating properties by chemisorption from plant extract on aluminum oxide. As a result of the sorption interaction, a yellow-green adsorbate was obtained. The presence of flavonoids in the adsorbate was confirmed by spectral characteristics. The obtained results confirm the role of phenolic compounds in increasing the competitiveness of invasive plants according to the shifting defence hypothesis. The proposed methodological approaches can be applied to identify invasive species at the flowering stage and when using the resource potential of these plants to obtain biologically active substances.

**Key words:** common ragweed, UV-absorbing flavonoids, photoprotective effect, reflectance and colorimetric characteristics

### Постановка проблеми

Амброзію полинолисту *Ambrosia artemisiifolia* L. вважають одним із агресивних інвазійних видів рослин у різних регіонах світу (Montagnani et al., 2017; Neilyk & Tsytsiura, 2020). *A. artemisiifolia* віднесено до небезпечних рослин-алергенів, оскільки її пилок спричиняє масові алергічні захворювання (Knolmajer et al., 2024). Для степової зони України підтверджена тенденція до збільшення кількості амброзії у різних рослинних угрупованнях (агро-фітоценози, лісонасадження, фітоценози урбанізованих територій, луки і пасовища) (Gavrilyuk et al., 2023; Udzhmadzhuridze & Lisovets, 2024). Інвазивність чужорідних рослин визначається комплексом функціональних ознак, які обумовлюють інтенсивне поширення видів адвентивних рослин та їхню загрозу для біорізноманіття (Giorgia et al., 2023). Серед цих функціональних ознак для амброзії слід відзначити репродуктивну ефективність, що забезпечує високу насінневу продуктивність і створює у ґрунті довговічний банк насіння, здатного до проростання упродовж багатьох років (Montagnani et al., 2017; Karrer et al., 2024).

Важливою стадією формування життєздатного насіння є фаза цвітіння. Квітки амброзії згруповані в головки, що містять чоловічі або жіночі квітки, і мають видозмінене суцвіття, яке пристосовано до вітрозапилення (Neilyk & Tsytsiura, 2020). За відношенням до світла амброзію полинолисту відносять до геліофільних рослин (Montagnani et al., 2017). Згідно запропонованої фітоіндикаційної шкали за типом Елленберга для *A. artemisiifolia* встановлено високе значення показника світлового фактору 8,0 (Tichý et al., 2023). Як геліофіти, що пристосовані до існування при повному сонячному освітленні у відкритих екосистемах, рослини амброзії є піонерними серед рудеральної рослинності

у різних антропогенно порушених територіях, зокрема унаслідок воєнних дій в Україні (Dubyna et al., 2022; Zavialova et al., 2022; Randelović et al., 2024). Оскільки висока інтенсивність світла може спричинити пошкодження важливих біологічних структур від УФ випромінювання, для геліофітів із високим значенням показника світлового фактору однією із життєвих стратегій, що забезпечують толерантність, є наявність механізму фотозахисту (Bartelheimer & Poschlod, 2016). Як правило, такий механізм реалізується завдяки локалізації у поверхневих рослинних тканинах УФ-поглинальних спеціалізованих метаболітів, які виконують роль УФ-фільтра, захищаючи від шкідливого впливу випромінювання у цьому спектральному діапазоні (Humbal & Pathak, 2023).

Серед таких метаболітів відомі фенольні сполуки, світлопоглинальні властивості яких забезпечують фотопротекторну функцію у рослинах (Ferreira, et al., 2021). Раніше встановлено, що із збільшенням рівня освітлення підвищувалось накопичення поліфенольних сполук та активності антиоксидантних ферментів у листках амброзії у більшому ступеню порівняно із нативним видом (Qin et al., 2013). Підвищену ефективність антиоксидантної відповіді слід розглядати як функціональну ознаку інвазивності, яка проявляється у захисті рослин від стресу, спричиненого високим рівнем опромінення (Qin et al., 2013). Разом із тим, фотопротекторна роль фенольних сполук у квітках *A. artemisiifolia* на стадії цвітіння не досліджена. Для підтвердження такої ролі, на нашу думку, найбільш адекватним методом дослідження є спектроскопія відбиття, що дозволяє моделювати процес взаємодії сонячного випромінювання залежно від довжини хвилі зі світлопоглинальними сполуками, які локалі-



зовані у поверхневих тканинах квіток (Fedenko, 2024). Такі дослідження можуть бути актуальними у контексті розробки мультиспектральних підходів для ідентифікації інвазійних рослин на стадії цвітіння (Paz-Kagan et al., 2019).

Мета – встановлення світлопоглинальної здатності квіток амброзії полинолистої.

### Матеріали та методи досліджень

За об'єкт дослідження обрано амброзію полинолисту *A. artemisiifolia*. Оскільки амброзія належить до групи світлолюбних рослин, відбір чоловічих квіток проводили на стадії цвітіння у верхній частині крони, де рослини отримують максимальну кількість світла і цей процес відбувається найінтенсивніше (Parakhnenko et al., 2023). Відбір рослинного матеріалу здійснювали у серпні 2024 р. на відкритій території луку біля річки Мокра Сура (Новоолександрівка, Дніпровський район, Дніпропетровська область).

Екстракцію квіток ізопропанолом та хемосорбцію сполук із екстракту на поверхні оксиду алюмінію проводили за рекомендаціями роботи (Fedenko, 2022). Контроль за процесом хемосорбції здійснювали за величиною оптичної густини екстракту при 350 нм до і після обробки  $Al_2O_3$  на спектрофотометрі DU – 7 NS. Аналітична довжина хвилі обрана на підставі літературних даних щодо положення максимумів поглинання флавонів і флавонолів у цьому спектральному діапазоні (Taniguchi et al., 2023). Для обчислення ступеню хемосорбції ( $X$ , %) використовували рівняння (1):

$$X = (A_0 - A_1) \cdot 100 / A_0 \quad (1),$$

де  $A_0$  – оптична густина вихідного екстракту;

$A_1$  – оптична густина екстракту після обробки  $Al_2O_3$ .

Аналогічні умови вимірювання відбивальних і колориметричних параметрів квіток та іммобілізованого препарату (адсорбату) створювали за рахунок користування стандартним тримачем твердих зразків за умови повного покриття поверхні (діаметр 2 см).

Спектри відбиття отримували в діапазоні 350–800 нм на спектрофотометрі Specord M40 (Німеччина), додатково обладнаному приставкою з фотометричною кулею і касетою «Data Handling I» для

математичної обробки результатів вимірювання, що дозволило проводити згладжування спектральних кривих із виключенням випадкових шумових піків (Fedenko, 2007). Корекцію 100 %-ої лінії проводили за стандартом  $MgO$ , оптичної нульової точки – за стандартом чорного порожнистого тіла. Інтенсивність спектрів відбиття наводили в одиницях абсорбції.

Для колориметричних вимірювань використовували спектрофотометр Specord M 40 з іншою касетою для математичної обробки «Color Measurement». Координати кольору ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) та координати кольоровості ( $x$ ,  $y$ ) визначали в системі CIE XYZ. Домінуючу довжину хвилі  $\lambda_d$  та умовну чистоту кольорового тону  $P_e$  встановлювали графічним способом за координатами зразків у кольоровому просторі (Fedenko, 2007). У колориметричній системі CIE  $L^*a^*b^*$  визначали інтегральний коефіцієнт яскравості  $L^*$  та колориметричні коефіцієнти  $a^*$  (співвідношення зеленої і червоної складових кольору) і  $b^*$  (співвідношення синьої та жовтої складових кольору).

Похибка вимірювань спектральних параметрів не перевищувала 5 %. Статистичну обробку експериментальних даних проводили з 5 % рівнем значущості.

### Результати та їх обговорення

У результаті дослідження спектрального розподілу світлового потоку, що відбивається від поверхневих тканин, світлопоглинальна здатність квіток охарактеризована наявністю декількох максимумів, обумовлених сполуками із різними хромоформними системами (рис. 1). Інтенсивні максимуми при 360 ( $\lambda_{1к}$ ) і 390 ( $\lambda_{2к}$ ) нм віднесено до УФ-поглинальних флавоноїдів, які ідентифіковані у суцвіттях *A. artemisiifolia* (Zeng et al., 2022). Інші максимуми у спектрі пов'язані із такими біохромами: каротиноїди і смуга Core хлорофілів – 455 ( $\lambda_{3к}$ ) і 480 нм ( $\lambda_{4к}$ ), продукти катаболізму хлорофілів – 585 ( $\lambda_{5к}$ ) і 620 нм ( $\lambda_{6к}$ ), Q-смуга хлорофілів – 677 нм ( $\lambda_{7к}$ ) (Karg et al., 2023). Для порівняльної характеристики смуг використано співвідношення оптичної густини найінтенсивнішого короткохвильового максимуму  $A_{1к}$  (1,06) та оптичної густини інших максимумів  $A_{2к}$  (1,04),  $A_{3к}$  (0,80),  $A_{4к}$  (0,77),  $A_{5к}$  (0,42),  $A_{6к}$  (0,43),  $A_{7к}$  (0,52). Аналізуючи розраховані величини співвідношень, слід

зазначити, що відносно максимуму  $\lambda_{1к}$  тільки максимум  $\lambda_{2к}$  мав порівняну інтенсивність, тоді як для інших максимумів цей показник був нижчим на 25 – 60 % ( $A_{2к}/A_{1к} - 0,98$ ;  $A_{3к}/A_{1к} - 0,75$ ;  $A_{4к}/A_{1к} - 0,73$ ;  $A_{5к}/A_{1к} - 0,40$ ;  $A_{6к}/A_{1к} - 0,41$ ;  $A_{7к}/A_{1к} - 0,49$ ). Для збільшення ступеня розподілення виявлених максимумів проведено дифе-

ренціювання спектральної кривої відбиття квіток. Перша похідна спектру представлена сімома смугами, кожна із яких складалась із відповідних максимуму і мінімуму (рис. 1). Положення цих екстремумів на спектральній кривій наведено у табл. 1.

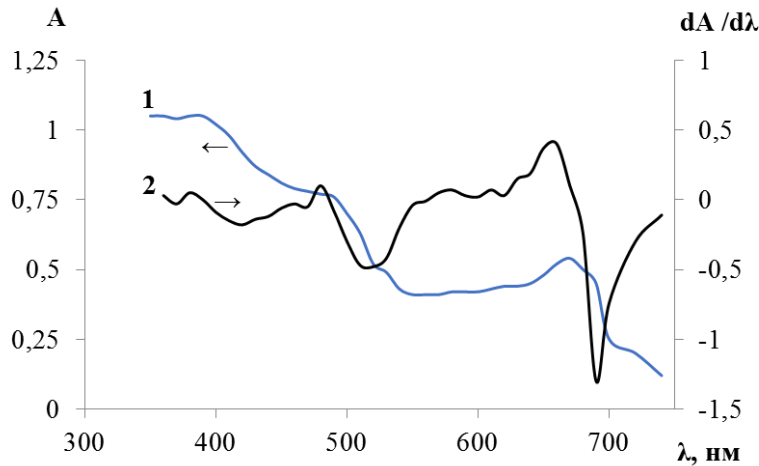


Рис. 1. Спектр відбиття (1) і перша похідна спектру (2) квіток *A. artemisiifolia*

Таблиця 1

Характеристика смуг першої похідної спектру відбиття квіток *A. artemisiifolia*

Смуга	$\lambda_{\text{макс}}, \text{нм}$	$\lambda_{\text{мін}}, \text{нм}$
I	359	371
II	383	419
III	460	475
IV	491	518
V	575	596
VI	614	626
VII	666	694

Підвищена інтенсивність максимумів  $\lambda_{1к}$  і  $\lambda_{2к}$  у спектрах відбиття підтвердила фотопротекторний ефект флавонолів і флавонів, ідентифікованих у суцвіттях *A. artemisiifolia* (Zeng et al., 2022). Функціонування цих сполук як світлофільтрів для поглинання фотонів УФ-радіації (Ferreira, et al., 2021) пов'язано із визначальним фактором ступеню фотозахисту, який обумовлено наявністю двох смуг із високою поглинальною здатністю в УФ-А (315–400 нм) та УФ-В (280–315 нм) діапазонах (Taniguchi et al., 2023).

У результаті перетворення спектрального розподілу інтенсивності відбиття залежно від довжини хвилі отримано від-

повідні колориметричні параметри квіток (табл. 2). Наявність у спектрі відбиття максимумів  $\lambda_{2к}$ ,  $\lambda_{3к}$ ,  $\lambda_{4к}$  із високою інтенсивністю обумовила стимул із домінуютьною довжиною хвилі квіток у діапазоні жовтого кольору (табл. 2). Значення величини умовної чистоти кольорового тону є результатом суперпозиції декількох стимулів різних біохромів згідно фізичної закономірності складання кольорів (Ohta, Robertson, 2006). Встановлені значення коефіцієнтів  $a^*$  і  $b^*$  визначили координати квіток у кольоровому просторі рівноконтрастної колориметричної системи (Cairone et al., 2020) (табл. 2).

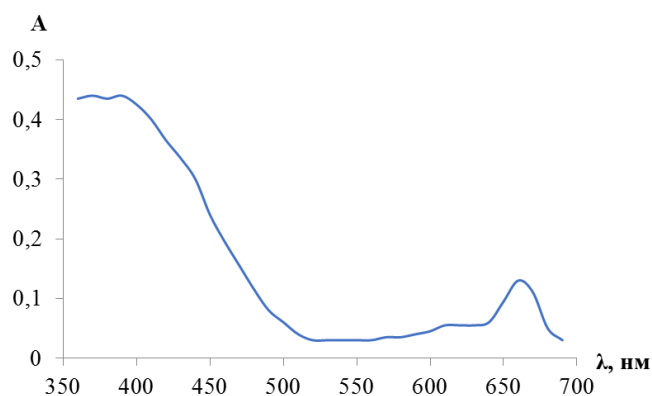


Рис. 2. Спектр відбиття адсорбату з екстракту квіток *A. artemisiifolia* на оксиді алюмінію

Таблиця 2

Колориметричні характеристики квіток *A. artemisiifolia* і адсорбату з екстракту квіток на оксиді алюмінію

Колориметричний параметр	Квітки	Адсорбат із екстракту квіток на $Al_2O_3$
$\lambda_d$ , нм	579,0	574,3
$P_e$ , %	45,34	22,67
$L^*$	67,86	97,15
$a^*$	-9,57	-19,97
$b^*$	-12,32	-50,40

Окрім визначення світлопоглинальної здатності *in vivo*, флавоноїди можуть бути ідентифіковані завдяки хелатувальним властивостям шляхом хемосорбції із рослинного екстракту на  $Al_2O_3$  та наступним визначенням спектральних характеристик продукту взаємодії (адсорбату) (Fedenko, 2022). Для флавоноїдів, ідентифікованих у суцвіттях *A. artemisiifolia* (Zeng et al., 2022), хелатувальна властивість пов'язана із наявністю сайтів зв'язування металів у структурі цих сполук. У результаті сорбційної взаємодії флавоноїдів із  $Al_2O_3$  отримано адсорбат жовто-зеленого кольору. За даними спектрофотометричного контролю ступінь хемосорбції флавоноїдів склала 88,6 %. Порівняно із квітками (рис. 1) у спектрі відбиття адсорбату зберігалась наявність максимумів 368 ( $\lambda_{1a}$ ), 392 ( $\lambda_{2a}$ ), 620 ( $\lambda_{6a}$ ) і 671 нм ( $\lambda_{7a}$ ) нм (рис. 2), що підтвердило адсорбцію флавоноїдів та хлорофілів на поверхні сорбенту.

Відсутність у спектрі адсорбату (рис. 2) максимумів, таких як  $\lambda_{3k}$  (455 нм) і  $\lambda_{4k}$  (480 нм) у спектрі відбиття квіток (рис. 1), свідчило, що адсорбція каротиноїдів не відбувалась. Батохромне зміщення

на 8 нм максимуму  $\lambda_{1a}$  у спектрі адсорбату порівняно із максимумом  $\lambda_{1k}$  у спектрі квіток підтвердило, що сорбційна взаємодія флавоноїдів з поверхнею оксиду алюмінію з екстракту квіток відбувалась шляхом хемосорбції із неасоційованими поверхневими групами  $\equiv AlOH$  сорбенту (Fedenko, 2022). Максимуми  $\lambda_{1a}$  і  $\lambda_{2a}$  у спектрі адсорбату мали порівняну інтенсивність, а співвідношення оптичної густини максимумів  $A_{6a}$  й  $A_{7a}$  відносно  $A_{1a}$  ( $A_{6a}/A_{1a} - 0,14$ ;  $A_{7a}/A_{1a} - 0,30$ ) знижувалось порівняно з аналогічними показниками у спектрі відбиття квіток, що слід пояснити зменшенням кількості адсорбованих хлорофілів відносно флавоноїдів порівняно із квітками.

Додаткові характеристики пігментованого адсорбату отримано у результаті розрахунку колориметричних параметрів (табл. 2). Порівняно із кольоровим стимулом квіток відсутність каротиноїдів у складі адсорбованих пігментів позначилось на зменшенні домінувальної довжини хвилі іммобілізованого препарату на 4,7 нм, що відповідало діапазону жовто-зеленого кольору. Тенденція зменшення від'ємних

значень також відзначена для колориметричних коефіцієнтів  $a^*$  і  $b^*$  (табл. 2).

Аналізуючи отримані результати, слід зазначити, що при моделюванні залежно від довжини хвилі взаємодії сонячного випромінювання зі сполуками, які локалізовані у поверхневих тканинах квіток *A. artemisiifolia*, встановлена їхня підвищена світлопоглинальна здатність в УФ-А діапазоні. Така здатність пов'язана із підвищеним накопиченням УФ-поглинальних флавоноїдів у поверхневих тканинах квіток. Відповідно до цифрової бази даних спектрів поглинання флавоноїдів (Taniguchi et al., 2023) спектральні параметри флавонів і флавонолів, які ідентифіковані у суцвіттях амброзії полинолістої (Zeng et al., 2022), підтверджують їхню значну протекторну здатність відносно УФ-А радіації. Фотозахист генеративних органів на стадії цвітіння забезпечує високу насінневу продуктивність як одну із характерних інвазійних стратегій *A. artemisiifolia*. Встановлена нами відмінність відбивальних характеристик квіток цього інвазійного виду може слугувати маркерною ознакою рослин-геліофітів на додаток до високих значень показника світлового фактора у фітоіндикаційній шкалі за типом Елленберга (Tichý et al., 2023) та бальній шкалі визначення адаптаційного потенціалу *A. artemisiifolia* (Parakhnenko et al., 2023). Слід також додати, що за даними (Qin et al., 2012) для амброзії порівняно із нативними видами характерна значна пластичність до світлового режиму, що проявлялось у стабільності фізіологічних функцій як за умов затінення, так і при повному освітленні. Таку особливість слід пояснити як прояв загальної тенденції використання мінімуму світлового ресурсу порівняно із нативними видами, що розглядають як ознаку підсилення інвазивності (Funk, 2013). З урахуванням цих фактів слід зазначити, що для *A. artemisiifolia* характерна адаптація до двох екстремальних світлових режимів: при низькому рівні освітлення підвищена ефективність використання сонячної радіації, а при повному освітленні – фотозахист завдяки локалізації у поверхневих тканинах УФ-поглинальних флавоноїдів.

Підвищена світлопоглинальна здатність в УФ-А діапазоні раніше нами також встановлена для квіток ентомофільного інвазійного виду *Erigeron annuus* (L.) Pers.,

для якого локалізовані у поверхневих тканинах флавоноїди виконують як роль світлофільтра шляхом поглинання фотонів УФ-радіації, так і атрактивну функцію у процесі запилення, оскільки тенденція підвищеного накопичення УФ-поглинальних флавоноїдів відповідає підвищенню сприйняття випромінювання максимально чутливого УФ-рецептору запилювачів (Fedenko, 2024). Таку тенденцію слід розглядати як адаптивне підсилення репродуктивної системи інвазійних видів (Barrett et al., 2008).

Окрім світлопоглинальної здатності, завдяки своїй поліфункціональності, фенольні метаболіти залучені в інших адаптивних процесах рослин у несприятливих умовах середовища (Fedenko et al., 2020). Толерантність до абіотичних та біотичних стресорів завдяки індукції фенольних метаболітів сприяє підвищенню інвазивності *A. artemisiifolia* в умовах кліматичних змін (Solarz et al., 2023; Yin et al., 2023; Syngkli & Rai, 2025). Отримані результати підтверджують роль фенольних метаболітів у підвищенні конкурентоспроможності інвазійних рослин відповідно до гіпотези зміни захисту (shifting defence hypothesis) (Wan et al. 2019).

Підвищена толерантність до високого рівня металів та органічних полютантів обумовлює конкурентну перевагу *A. artemisiifolia* порівняно з аборигенними видами при хімічному забрудненні природного середовища, що дало підстави рекомендувати цей інвазійний вид для технологій фіторемедіації (Fedenko et al., 2020) відповідно сучасного тренду використання рудеральних видів у відновленні деградованих земель (Randelović et al., 2024).

Інший аспект отриманих результатів пов'язано із сучасним напрямом використання ресурсного потенціалу інвазійних рослин для отримання біологічно активних речовин (Lorenzo & Morais, 2023). У зв'язку з цим проведені дослідження складу фенольних сполук, які обумовлюють антиоксидантну, антиліпазну, антимікробну та цитотоксичну активність екстрактів амброзії полинолістої (Maksimović, 2008; Mihajlovic et al., 2015; Poljuha et al., 2022; Zeng et al., 2022; Quinty et al., 2023). Встановлена нами здатність до хемосорбції флавоноїдів з екстракту *A. artemisiifolia* може бути використана для концентрування, стабілізації цих природних антио-

кисидантів, створення біогібридних матеріалів і композицій з твердим дисперсійним середовищем для покращення біофармацевтичних характеристик (підвищення розчинності та біодоступності фармацевтично активних інгредієнтів) (Colombo et al., 2022).

Отримані результати також удосконалюють деякі методичні підходи. Використаний аналіз спектрального розподілу інтенсивності в одиницях абсорбції дозволив отримати більш структуровані спектри біохромів, локалізованих у поверхневих тканинах квіток, на відміну від дослідження залежності коефіцієнта відбиття листків і стебел *A. artemisiifolia* (Dammer et al., 2013). Такий прийом розширює методичну базу спектральних підходів для ідентифікації інвазійних рослин на стадії цвітіння (Paz-Kagan et al., 2019). Інший методичний аспект отриманих результатів стосується удосконалення діагностики хелатувальної здатності у прояві алелопатичної активності інвазійних рослин (Likhanov et al., 2021), оскільки така активність для *A. artemisiifolia* обумовлена фенольними метаболітами поряд із іншими сполуками (Knolmajer et al., 2024).

### Висновки

У результаті моделювання процесу взаємодії випромінювання залежно від довжини хвилі зі світлопоглинальними сполуками, які локалізовані у поверхневих

тканинах встановлено, що визначальною особливістю спектрів відбиття квіток інвазійного виду *A. artemisiifolia* як геліофіту є підвищення інтенсивності максимуму УФ-поглинальних флавоноїдів порівняно із каротиноїдами та хлорофілами. Для збільшення ступеня розподілення виявлених максимумів проведено диференціювання спектральної кривої відбиття. Досліджені квітки також охарактеризовано специфічною сукупністю колориметричних параметрів. Флавоноїди ідентифіковані завдяки хелатувальним властивостям шляхом хемосорбції із рослинного екстракту на оксиді алюмінію та наступним визначенням спектральних характеристик продукту взаємодії. Підвищена локалізація флавоноїдів, що поглинають ультрафіолет, у поверхневих тканинах квіток обумовлює збільшення фотопротекторної здатності як адаптивне підсилення репродуктивної системи інвазійного виду. Отримані результати на прикладі *A. artemisiifolia* підтверджують роль фенольних сполук у підвищенні конкурентоспроможності інвазійних рослин згідно гіпотези зміни захисту (shifting defence hypothesis). Запропоновані методичні підходи можуть бути застосовані для ідентифікації інвазійних видів на стадії цвітіння та при використанні ресурсного потенціалу цих рослин для отримання біологічно активних речовин.

### 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.

## References

- Barrett, S. C., Colautti, R. I., & Eckert, C. G. (2008). Plant reproductive systems and evolution during biological invasion. *Molecular Ecology*, 17(1), 373-383. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2007.03503.x>
- Bartelheimer, M., & Poschlod, P. (2016). Functional characterizations of Ellenberg indicator values—a review on ecophysiological determinants. *Functional Ecology*, 30(4), 506-516. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12531>
- Cairone, F., Carradori, S., Locatelli, M., Casadei, M. A., & Cesa, S. (2020). Reflectance colorimetry: A mirror for food quality—A mini review. *European Food Research and Technology*, 246(2), 259-272. <https://doi.org/10.1007/s00217-019-03345-6>
- Colombo, M., Michels, L. R., Teixeira, H. F., & Koester, L. S. (2022). Flavonoid delivery by solid dispersion: a systematic review. *Phytochemistry Reviews*, 21, 783–808. <https://doi.org/10.1007/s11101-021-09763-3>
- Dammer, K. H., Intress, J., Beuche, H., Selbeck, J., & Dworak, V. (2013). Discrimination of *Ambrosia artemisiifolia* and *Artemisia vulgaris* by hyperspectral image analysis during the growing season. *Weed Research*, 53(2), 146-156. <https://doi.org/10.1111/wre.12006>
- Dubyna, D. V., Dziuba, T. P., Iemelianova, S. M., Protopopova, V. V., & Shevera, M. V. (2022). Alien species in the pioneer and ruderal vegetation of Ukraine. *Diversity*, 14(12), 1085. <https://doi.org/10.3390/d14121085>
- Fedenko, V. S. (2022). Chemisorption of flavonoids from canadian goldenrod on aluminum oxide. *Journal of Chemistry and Technologies*, 30(3), 340-348. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i3.262972> (in Ukrainian)  
Феденко В. С. Хемосорбція флавоноїдів золотушника канадського на оксиді алюмінію. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2022. Т.30, №3. С. 340-348. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i3.262972>
- Fedenko, V.S. (2007). Dose effect of cyanidin interaction with lead ions in roots of maize seedlings. *Ukrainian Biochemical Journal*, 79(2), 24–29 (in Ukrainian).  
Феденко В. С. Дозовий ефект взаємодії ціанідину з іонами свинцю в коренях проростків кукурудзи. *Український біохімічний журнал*. 2007. Т. 79, №2. С. 24–29.
- Fedenko, V. S. (2024). Reflectance characteristics of flowers as a criterion for invasiveness of *Erigeron annuus* (L.) Pers. *Ecology and Noospherology*, 35(1), 52-57. <https://doi.org/10.15421/032409> (in Ukrainian)  
Феденко В. С. Відбивальні характеристики квіток як критерій інвазивності *Erigeron annuus* (L.) Pers. *Екологія та ноосферологія*. 2024. Т. 35, №1. С. 52-57. <https://doi.org/10.15421/032409>
- Fedenko, V. S. (2023). Transformation of vegetation under the conditions of the impact of military actions on the natural environment in Ukraine: A review. *Ecology and Noospherology*, 34(2), 101–107. <https://doi.org/10.15421/032315> (in Ukrainian)  
Феденко В. С. Трансформація рослинності за умов впливу воєнних дій на природне середовище в Україні (огляд літератури). *Екологія та ноосферологія*, 2023. Т.34, №2. С. 101-107. <https://doi.org/10.15421/032315>
- Fedenko, V. S., Shemet, S. A., Guidi, L., & Landi, M. (2020). Metal/metalloid-induced accumulation of phenolic compounds in plants. In: M. Landi, S. A. Shemet, & V. S. Fedenko (eds.). *Metal toxicity in higher plants*. N. Y. Nova Science Publishers, 67–115.
- Ferreyra, M. L. F., Serra, P., & Casati, P. (2021). Recent advances on the roles of flavonoids as plant protective molecules after UV and high light exposure. *Physiol. Plant.*, 173(3), 736-749. <https://doi.org/10.1111/ppl.13543>



- Funk, J. L. (2013). The physiology of invasive plants in low-resource environments. *Conservation physiology*, 1(1), cot026. <https://doi.org/10.1093/conphys/cot026>
- Gavrilyuk, Y., Aksyonov, I., Matsay, N., Beseda, A., & Aksyonova, I. (2023). Dissemination of the quarantine weeds of the genus *Ambrosia* in the steppe zone of Ukraine. *Acta agriculturae Slovenica*, 119(2), 1-9. <https://doi.org/10.14720/aas.2023.119.2.2492>
- Gioria, M., Hulme, P. E., Richardson, D. M., & Pyšek, P. (2023). Why are invasive plants successful? *Annual Review of Plant Biology*, 74, 635-670. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-070522-071021>
- Humbal, A., & Pathak, B. (2023). Influence of exogenous elicitors on the production of secondary metabolite in plants: A review ("VSI: secondary metabolites"). *Plant Stress*, 8, 100166. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100166>
- Karg, C. A., Taniguchi, M., Lindsey, J. S., & Moser, S. (2023). Phyllobilins—Bioactive natural products derived from chlorophyll—Plant origins, structures, absorption spectra, and biomedical properties. *Planta Medica*, 89(06), 637-662. <https://doi.org/10.1055/a-1955-4624>
- Karrer, G., Lehner, F., Waldhaeuser, N., Knolmayer, B., Hall, R. M., Poór, J., Jócsák, I., & Kazinczi, G. (2024) Long-term seed survival of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) after burial. *NeoBiota*, 96, 363–379. <https://doi.org/10.3897/neobiota.96.130750>
- Knolmayer, B., Jócsák, I., Taller, J., Keszthelyi, S., & Kazinczi, G. (2024). Common Ragweed—*Ambrosia artemisiifolia* L.: A Review with Special Regards to the Latest Results in Biology and Ecology. *Agronomy*, 14(3), 497. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030497>
- Likhanov, A., Oliinyk, M., Pashkevych, N., Churilov, A., & Kozyr, M. (2021). The role of flavonoids in invasion strategy of *Solidago canadensis* L. *Plants*, 10(8), 1748. <https://doi.org/10.3390/plants10081748>
- Lorenzo, P., & Morais, M. C. (2023). Strategies for the management of aggressive invasive plant species. *Plants*, 12(13), 2482. <https://doi.org/10.3390/plants12132482>
- Maksimović, Z. (2008). In vitro antioxidant activity of ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L., Asteraceae) herb. *Industrial Crops and Products*, 28(3), 356-360. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.04.001>
- Mihajlovic, L., Radosavljevic, J., Burazer, L., Smiljanic, K., & Velickovic, T. C. (2015). Composition of polyphenol and polyamide compounds in common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) pollen and sub-pollen particles. *Phytochemistry*, 109, 125-132. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2014.10.022>
- Montagnani, C., Gentili, R., Smith, M., Guarino, M. F., & Citterio, S. (2017). The worldwide spread, success, and impact of ragweed (*Ambrosia* spp.). *Critical Reviews in Plant Sciences*, 36(3), 139-178. <https://doi.org/10.1080/07352689.2017.1360112>
- Neilyk, M. M., & Tsytsiura, Y. G. (2020). Ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.): taxonomy, biology, adaptive potential and control strategy. Vynnytsia. (in Ukrainian)  
Неїлик М. М., Цицюра Я. Г. Амбросія полиноліста (*Ambrosia artemisiifolia* L.): систематика, біологія, адаптивний потенціал та стратегія контролю. Вінниця: Друк плюс, 2020. 700 с.
- Ohta, N., & Robertson, A. (2006). *Colorimetry: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.



- Parakhnenko, V., Vitenko, V., Didenko, I., Koval, S., & Chernysh, V. (2023). Distribution of *Ambrosia artemisiifolia* L. in the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine and its adaptive potential. *Trakya University Journal of Natural Sciences*, 24(2), 31-40. <https://doi.org/10.23902/trkjnat.1188477>
- Paz-Kagan, T., Silver, M., Panov, N., & Karnieli, A. (2019). Multispectral approach for identifying invasive plant species based on flowering phenology characteristics. *Remote Sensing*, 11(8), 953. <https://doi.org/10.3390/rs11080953>
- Poljuha, D., Sladonja, B., Šola, I., Šenica, M., Uzelac, M., Veberic, R.; Hudina, M., Famuyide, I. M., Eloff, J. N., & Mikulic-Petkovsek, M. (2022). LC-DAD-MS phenolic characterisation of six invasive plant species in Croatia and determination of their antimicrobial and cytotoxic activity. *Plants*, 11, 596. <https://doi.org/10.3390/plants11050596>
- Qin, Z., Mao, D., Quan, G., Zhang, J. E., Xie, J., & DiTommaso, A. (2013). Antioxidant response of the invasive herb *Ambrosia artemisiifolia* L. to different irradiance levels. *Phytoprotection*, 93(1), 8-15. <https://doi.org/10.7202/1015232ar>
- Qin, Z., Mao, D. J., Quan, G. M., Zhang, J. E., Xie, J. F., & DiTommaso, A. (2012). Physiological and morphological responses of invasive *Ambrosia artemisiifolia* (common ragweed) to different irradiances. *Botany*, 90(12), 1284-1294. <https://doi.org/10.1139/b2012-096>
- Randelović, D., Jakovljević, K., Šinžar-Sekulić, J., Kuzmič, F., & Šilc, U. (2024). Recognising the role of ruderal species in restoration of degraded lands. *Science of The Total Environment*, 938, 173104. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173104>
- Solarz, W., Najberek, K., Tokarska-Guzik, B., & Pietrzyk-Kaszyńska, A. (2023). Climate change as a factor enhancing the invasiveness of alien species. *Environmental & Socio-economic Studies*, 11(4), 36-48. <https://doi.org/10.2478/environ-2023-0022>
- Syngkli, R. B., & Rai, P. K. (2025). Expanding horizon of invasive alien plants under the interacting effects of global climate change: multifaceted impacts and management prospects. *Climate Change Ecology*, 9, 100092. <https://doi.org/10.1016/j.ecochg.2025.100092>
- Taniguchi, M., LaRocca, C. A., Bernat, J. D., & Lindsey, J. S. (2023). Digital database of absorption spectra of diverse flavonoids enables structural comparisons and quantitative evaluations. *Journal of Natural Products*, 86(4), 1087-1119. <https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.2c00720>
- Tichý, L., Axmanová, I., Dengler, J., Guarino, R., Jansen, F., Midolo, G., Nobis, M.P., Van Meerbeek, K., Ačić, S., Attorre, F., Bergmeier, E., Biurrun, I., Bonari, G., Bruelheide, H., Campos, J. A., Čarni, A., Chiarucci, A., Čuk, M., Čušterevska, R., Didukh, Y., Dítě, D., Dítě, Z., Dziuba, T., Fanelli, G., Fernández-Pascual, E., Garbolino, E., Gavilán, R. G., Gégout, J.-C., Graf, U., Güler, B., Hájek, M., Hennekens, S. M., Jandt, U., Jašková, A., Jiménez-Alfaro, B., Julve, P., Kambach, S., Karger, D. N., Karrer, G., Kavgac, A., Knollová, I., Kuzemko, A., Kuzmič, F., Landucci, F., Lengyel, A., Lenoir, J., Marcenò, C., Moeslund, J. E., Novák, P., Pérez-Haase, A., Peterka, T., Pielech, R., Pignatti, A., Rašomavičius, V., Rūsiņa, S., Saatkamp, A., Šilc, U., Škvorc, Ž., Theurillat, J.-P., Wohlgemuth, T., & Chytrý, M. (2023). Ellenberg-type indicator values for European vascular plant species. *Journal of Vegetation Science*, 34(1), e13168. <https://doi.org/10.1111/jvs.13168>
- Udzhmadzhuridze, V. G., & Lisovets, O. I. (2024). Ecomorphic analysis of plant communities with *Ambrosia artemisiifolia* L. in the urban ecosystem of Dnipro city. *Issues of steppe forestry and forest reclamation of soils*, 24, 140-153. <https://doi.org/10.15421/442412>

Wan, J., Huang, B., Yu, H., & Peng, S. (2019). Reassociation of an invasive plant with its specialist herbivore provides a test of the shifting defence hypothesis. *Journal of Ecology*, 107(1), 361-371. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13019>

Yin, W., Zhou, L., Yang, K., Fang, J., Biere, A., Callaway, R. M., Wu, M., Yu, H., Shi, Y. & Ding, J. (2023). Rapid evolutionary trade-offs between resistance to herbivory and tolerance to abiotic stress in an invasive plant. *Ecology Letters*, 26(6), 942-954. <https://doi.org/10.1111/ele.14221>

Zavialova, L. V., Protopopova, V. V., Panchenko, S. M., Smagol, V. O., Kolomiichuk, V. P., Kucher, O. O., & Shevera, M. V. (2022). The synantropization of vegetation cover of Ukraine as impact of military actions. In: *Overcoming ecological risks and threats to the environment in emergency situations—2022*. Dnipro, 31-52. <https://doi.org/10.23939/monograph2022> (in Ukrainian)

Зав'ялова, Л. В., Протопопова В. В., Панченко, С. М., Смаголь, В. О., Коломійчук, В. П., Кучер, О.О., Шевера М. В. Синантропізація рослинного покриву України внаслідок воєнних дій. *Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій—2022*. Дніпро: Середняк Т. К., 2022. С. 31-52. <https://doi.org/10.23939/monograph2022>

Zeng, Z., Cheng, D., Lai, M. M., He, H. L., Qiu, L., Xue, J., Li, Y-Z., & Ding, W. B. (2022). A New lignan and C(6)-oxygenated flavonoids from the inflorescence of *Ambrosia artemisiifolia*. *Chemistry & Biodiversity*, 19(3), e202100897. <https://doi.org/10.1002/cbdv.202100897>

Received: 14.02.2025. Accepted: 10.03.2025. Published: 03.04.2025.

**Ви можете цитувати цю статтю так:**

Феденко В. Світлопоглинальна здатність квіток інвазійного виду *Ambrosia artemisiifolis* L. *Biota. Human. Technology*. 2025. №1. С. 28-38.

**Cite this article in APA style as:**

Fedenko, V. (2025). Light absorption capacity of flowers of the invasive species *Ambrosia artemisiifolis* L. *Biota. Human. Technology*, 1, P. 28-38. (in Ukrainian)

**Information about the author:**

**Fedenko V.** [in Ukrainian: **Феденко В.**], Senior scientific researcher, Ph.D., Senior scientific researcher, e-mail: [opticlub.fedenko@gmail.com](mailto:opticlub.fedenko@gmail.com)  
ORCID: 0000-0002-4696-6981 Researcher ID: C-7674-2016 Scopus-Author ID: 25023532500  
Oles Honchar Dnipro National University  
72 Nauky Avenue, Dnipro, 49045, Ukraine



# **ENVIRONMENTAL POLLUTION STRESSES AND ORGANISMS' RESPONSE**

**СТРЕСИ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ  
ТА РЕАКЦІЯ ОРГАНІЗМІВ**



UDC 620.193:669.018.8

DOI: 10.58407/bht.1.25.3



Copyright (c) 2025 Dmytrii Filonenko, Olha Mekhed

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/).

Dmytrii Filonenko, Olha Mekhed

**ASSESSMENT OF THE COMBINED EFFECT OF HEAVY METALS  
AND SURFACTANTS ON CARP FISH ORGANISMS**

Дмитрій Філоненко, Ольга Мехед

**ОЦІНКА КОМБІНОВАНОГО ВПЛИВУ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ І ПОВЕРХНЕВО-  
АКТИВНИХ РЕЧОВИН НА ОРГАНІЗМ КОРОПОВИХ РИБ****ABSTRACT**

Pollution of aquatic ecosystems is one of the current environmental problems that negatively affects aquatic organisms, in particular cyprinid fish. Heavy metals and surfactants are the main anthropogenic toxicants that can cause significant morphological and biochemical changes in the body of fish. Research into their impact is important for assessing the state of water resources and developing measures to reduce environmental risks.

**Purpose of the work:** to assess the impact of heavy metal ions ( $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ) and sodium lauryl sulfate on the morphological and biochemical indicators of the carp body. The object of the study is biochemical and morphological transformations in the carp body. The subject of the study is changes in the content of glucose, proteins, lipids and moisture in carp tissues under the influence of toxic substances.

**Methodology.** The study was conducted on two-year-old carp of the scaly and mirror morphotypes (*Cyprinus carpio* L.) weighing 250–350 g. Fish were kept in 200 dm<sup>3</sup> aquariums with settled tap water, in which a stable hydrochemical regime was maintained. Toxic load was created by introducing appropriate concentrations of  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  and sodium lauryl sulfate. Morphological changes (damage to the skin, fins, gills) and biochemical parameters (content of glucose, proteins, lipids and moisture in tissues) were analyzed. The results obtained were processed by statistical methods.

**Scientific novelty.** For the first time, the combined effect of heavy metals and surfactants on the morphological and biochemical parameters of the carp organism was studied, which allows using ichthyological parameters as bioindicators of aquatic environment pollution.

**Conclusions.** During the experiment, changes in the appearance of the fish were observed, in particular damage to the fins and skin and scales, increased mucus secretion in carp that were in an aquarium with sodium lauryl sulfate for 14 days. When toxicants of various origins act on the fish body, the glucose content is more sensitive than the total protein content. These indicators can be recommended for monitoring water bodies using fish of the cyprinid family. Under the influence of toxic environmental conditions, a decrease in the lipid content was observed in both white muscles and liver tissues, with the exception of the simultaneous exposure to sodium lauryl sulfate and ions. An increase in the amount of lipids in the liver can lead to exhaustion of the body and indicate tissue degeneration. When studying the effect of toxic substances on the moisture content in various carp tissues, no significant changes were observed. The presence of a multi-stage cell defense system, which has developed during phylogenetic development, determines the complexity of the cause-and-effect relationships between biochemical processes and their focus, primarily, on maintaining the optimal metabolic balance of the cell and the organism as a whole, which is expressed in changes in biochemical indicators.

**Key words:** scaly carp, heavy metals, surfactants, ichthyological indicators, metabolic changes

**АНОТАЦІЯ**

Забруднення водних екосистем є однією з актуальних екологічних проблем, що негативно впливає на гідробіонтів, зокрема на корошових риб. Важкі метали та поверхнево-активні речовини є основними антропогенними токсикантами, які можуть спричинити значні морфологічні та біохімічні зміни в організмі риб. Дослідження їхнього впливу є важливим для оцінки стану водних ресурсів та розробки заходів щодо зменшення екологічних ризиків.

**Мета роботи:** оцінити вплив іонів важких металів ( $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ) та натрій лаурилсульфату на морфологічні та біохімічні показники організму коропа. Об'єкт дослідження – біохімічні та морфологічні перетворення в

організмі коропа. Предмет дослідження – зміни вмісту глюкози, білків, ліпідів і вологи в тканинах коропа під впливом токсичних речовин.

**Методологія.** Дослідження проводили на дворічних коропах лускатого та дзеркального морфотипів (*Cyprinus carpio* L.) масою 250–350 г. Риб утримували в акваріумах об'ємом 200 дм<sup>3</sup> із відстояною водопровідною водою, в якій підтримувався стабільний гідрохімічний режим. Токсичне навантаження створювали шляхом внесення відповідних концентрацій Zn<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> та натрій лаурилсульфату. Аналізували морфологічні зміни (пошкодження шкіри, плавців, зябер) та біохімічні показники (вміст глюкози, білків, ліпідів і вологи в тканинах). Отримані результати обробляли статистичними методами.

**Наукова новизна.** Вперше досліджено комбінований вплив важких металів та ПАР на морфологічні та біохімічні показники організму коропа, що дозволяє використовувати іхтіологічні параметри як біоіндикатори забруднення водного середовища.

**Висновки.** Під час досліду було зафіксовано зміни у зовнішньому вигляді риб, зокрема пошкодження плавців, шкірних покривів та луски, а також підвищене виділення слизу у коропів, що перебували в акваріумі з натрій лаурилсульфатом протягом 14 діб. Встановлено, що під впливом токсикантів різного походження рівень глюкози в організмі риб є більш чутливим показником порівняно з вмістом загального білка. Отримані результати дозволяють рекомендувати ці показники для моніторингу стану водойм із використанням риб родини коропових. За умов токсичного впливу спостерігалось зниження рівня ліпідів як у білих м'язах, так і в тканинах печінки, за винятком одночасного впливу натрій лаурилсульфату та йонів кадмію. Збільшення концентрації ліпідів у печінці може свідчити про енергетичне виснаження організму та можливі дегенеративні зміни у тканинах. Аналіз впливу токсичних речовин на вміст вологи в різних тканинах коропа не виявив значних змін. Високий рівень захисних механізмів клітини, що сформувалися в ході філогенетичного розвитку, обумовлює складність взаємозв'язків між біохімічними процесами та спрямованість цих змін, перш за все, на підтримку оптимального метаболічного балансу клітини та організму загалом, що проявляється у змінах біохімічних показників.

**Ключові слова:** короп лускатий, важкі метали, поверхнево-активні речовини, іхтіологічні показники, метаболічні зміни

## Formulation of the problem

The rapid pace of urbanization, human activity and the rapid development of science and technology have introduced significant changes into the historically formed relationships between living organisms in natural ecosystems, which are manifested in the disruption of their functioning and the impoverishment of the species composition. Aquatic ecosystems are characterized by significant anthropogenic load, because inland water bodies provide the needs of energy, water transport, industry, agriculture, etc. As a result of intensive exploitation, completely new, often toxic substances enter water bodies or the concentration of already existing ones significantly increases. Therefore, the comprehensive use of water resources leads to complex pollution of water bodies. Among the pollutants, heavy metals and surfactants (surfactants) have recently taken one of the first places. A significant increase in the content of heavy metals in water leads to numerous biochemical, physiological and morphological changes in the body. Since the normal life of fish is determined by the coordinated work of all functional systems and biochemical processes at their core, a deviation from the norm in one of them, caused by a toxicant, can lead to disruption of the life of the whole organism. Surfactants are

able to exert an inactivating or stimulating effect on enzyme systems and disrupt metabolic processes in the body.

In the modern world, pollution with heavy metals and surfactants is often observed simultaneously (Nikolaenko et al., 2023). That is why, to assess the possible combined effect of these toxicants on the fish organism, it is important to conduct studies aimed at establishing patterns, features and levels of accumulation of heavy metals in the organs and tissues of commercially valuable fish species in order to predict the possible impact of toxic substances on the composition and population of ichthyofauna.

**The purpose** of the work: study of the separate and combined effects of toxic concentrations of heavy metal ions (Zn<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>) and surfactant (sodium lauryl sulfate (SLS)) on the content of energy substrates and moisture in fish tissues.

## Materials and methods

The studies were conducted in November 2024 – January 2025 on two-river carp (*Cyprinus carpio* L.) weighing 250-350 g. According to ichthyological observations, no pathogens of parasitic diseases were detected in the fish. Experiments to study the effect of toxicants were carried out in model conditions – aquariums with a volume of 200 dm<sup>3</sup> with



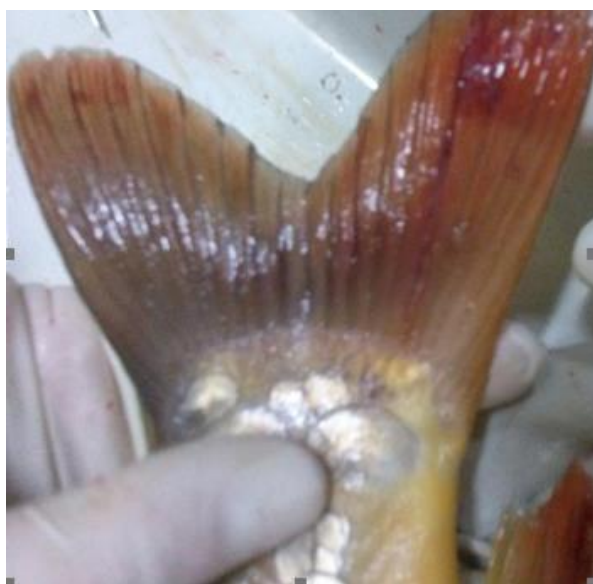
settled tap water, in which the fish were placed at the rate of 1 specimen per 40 dm<sup>3</sup> of water. The acclimation period was 3 days, the exposure to toxicants was 14 days. The fish were not fed. The total number of animals involved in the experiment was 40 fish. In all cases, control was carried out and a constant hydrochemical regime of the water was maintained. The pH value was  $7.30 \pm 0.27$ ; the oxygen content was  $5.6 \pm 0.4$  mg/dm<sup>3</sup>, the temperature was maintained close to natural. Tapeworms were also not recorded. The fish were kept in four variants: control, heavy metal exposure (Zn<sup>2+</sup> or Cd<sup>2+</sup>), surfactant exposure (sodium lauryl sulfate), simultaneous exposure to sodium lauryl sulfate and heavy metal ions (Zn<sup>2+</sup> or Cd<sup>2+</sup>). The concentration of xenobiotics, which corresponded to two maximum permissible concentrations, was created by adding sodium lauryl sulfate, 3CdSO<sub>4</sub> × 8H<sub>2</sub>O and Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> × 6H<sub>2</sub>O to the aquarium water. After the established time of exposure to xenobiotics (14 days), the animals were decapitated in accordance with the requirements of the International Principles of the Declaration of Helsinki (*World Medical Association, 2001*).

To determine biochemical parameters, tissue homogenate was prepared in 0.25M sucrose in a ratio of 1:10. Glucose content was determined by the glucose oxidase method using the "Reagent" reagent kit. Protein content was determined by the Lowry method (Lowry et al, 1951), which is based on the biuret color reaction. Total lipid content was determined using the "Reagent" reagent kit according to the kit recommendations. Statistical processing of the results was carried out according to general standards using the "Excel" program from the "Microsoft Office-2003" package and the Statistika 6.0 program.

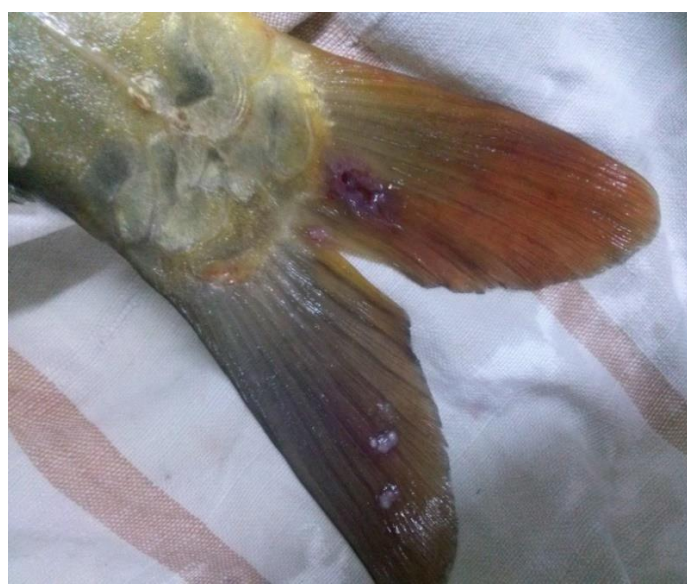
During the experiment, changes in the appearance of the fish were observed, in particular damage to the fins and skin and scales, increased mucus secretion in carp that were in an aquarium with sodium lauryl sulfate for 14 days.

### Results and discussions

Pus-filled blisters and damage to the caudal fin have been reported (Fig.1, 2).



**Fig. 1. Damage to the caudal fin of fish under experimental conditions**



**Fig. 2. Blisters on the skin of fish under the influence of xenobiotics**

During the study, pure sodium lauryl sulfate was used, which is more aggressive in its properties than impurities in a surfactant containing sodium lauryl sulfate, which are able to slow down the effect of the pure substance on the fish body. According to its chemical properties, sodium lauryl sulfate is able to break down fat molecules, cause irritation, peeling of the epithelium, scales, impaired gas exchange in

the gills, cause hemorrhages in the gills, skin, increase the functional activity of the liver, as a result of a decrease in the immunity of the fish (Musiyenko et al., 2005; Polotnianko & Mekhed, 2024). When removing fish from aquarium water, it was determined by morphological description that all fish in the experimental groups had body damage of various nature.



It is known that the adaptive mechanism of maintaining the glucose level in fish tissues is carried out due to gluconeogenesis, glycogenolysis and intertissue transfer. The level of glycogen in the studied tissues in autumn and winter is low (Grubinko, 2005), under the conditions of the experiment, the penetration of glucose into the carp organism from the environment was excluded, gluconeogenesis

was studied earlier (Grubinko, 2005; Matiushko & Mekhed, 2024), the authors noted the activation of enzymes of this glucose synthesis pathway under the action of toxicants, in particular heavy metals. Therefore, it is interesting to study the change in the content of this metabolite in fish tissues under the combined action of surfactants and heavy metal ions, as presented in Tables 1 and 2.

Table 1

Glucose content in carp tissues under the action of xenobiotics (mg/ml;  $M \pm m$ , n=5)

Organ/Tissue	Control	Zn <sup>2+</sup>	SLS	Zn <sup>2+</sup> + SLS
Muscle	37.9±2.4	30.1±2.4	34.8±3.2	27.8±3.1*
Liver	118.0±6.8	84.2±2.4*	112.6±8.6	72.5±3.5*

Both toxicants, both individually and in combination, cause a decrease in glucose levels in both tissues studied. The maximum changes

were observed in the liver with the simultaneous action of lead and sodium lauryl sulfate.

Table 2

Glucose content in carp tissues under the action of xenobiotics (mg/ml;  $M \pm m$ , n=5)

Organ/Tissue	Control	Cd <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup> + SLS
Muscle	44.5±4.6	40.4±3.2	39.2±2.8
Liver	138.4±12.4	122.0±4.8	85.8±6.4

Under the action of cadmium ions, as well as cadmium ions simultaneously with LSN, a decrease in the studied indicator was noted, however, the indicated differences in the glucose level in fish of the control and experimental groups are not probable.

The decrease in the glucose content in the tissues can be explained by metabolic transformations, participation in a number of metabolic systems, which are manifested in an increase in the activity of the corresponding enzymes (Yatsenko et al., 2017). Thus, it can be

concluded that the glucose content in various carp tissues under the action of heavy metal ions and surfactants is sufficiently informative

The results of the study of the content of total protein in the tissues of carp two-year-olds are presented in tables 3 and 4. As the results of the studies showed, the highest protein content corresponded to liver tissues, approximately one third less was found in muscle tissue. Under the influence of extreme factors, these ratios did not change significantly, with the exception of the combined action of toxicants.

Table 3

The content of total protein in fish tissues under the influence of xenobiotics

(mg/ml;  $M \pm m$ , n=5)

Organ/Tissue	Control	Zn <sup>2+</sup>	SLS	Zn <sup>2+</sup> + SLS
Muscle	8.5±0.7	7.8±0.6	8.3±1.0	7.5±0.8
Liver	13.2±0.4	12.0±0.8	12.5±1.2	13.0±0.7

Both toxicants cause a slight decrease in the level of total protein in both white muscles and liver (Zhelai et al., 2023). Maximum changes in muscle tissue were

observed with simultaneous exposure to lead and sodium lauryl sulfate, in contrast to the liver.

Table 4

The content of total protein in fish tissues under the influence of xenobiotics (mg/ml;  $M \pm m$ ,  $n=5$ )

Organ/Tissue	Control	$Cd^{2+}$	$Cd^{2+}$ + SLS
Muscle	9.6 $\pm$ 0.4	8.8 $\pm$ 0.4	8.5 $\pm$ 0.8
Liver	15.2 $\pm$ 0.4	14.0 $\pm$ 0.8	13.5 $\pm$ 1.7

Thus, in the liver and muscles of carp, the studied toxicants caused a decrease in the content of total protein, however, the indicators did not differ significantly in fish of the control and experimental groups, the observed differences are unlikely.

When studying the effect of toxic substances on the moisture content in various carp tissues (Fig. 3), no significant changes were observed.

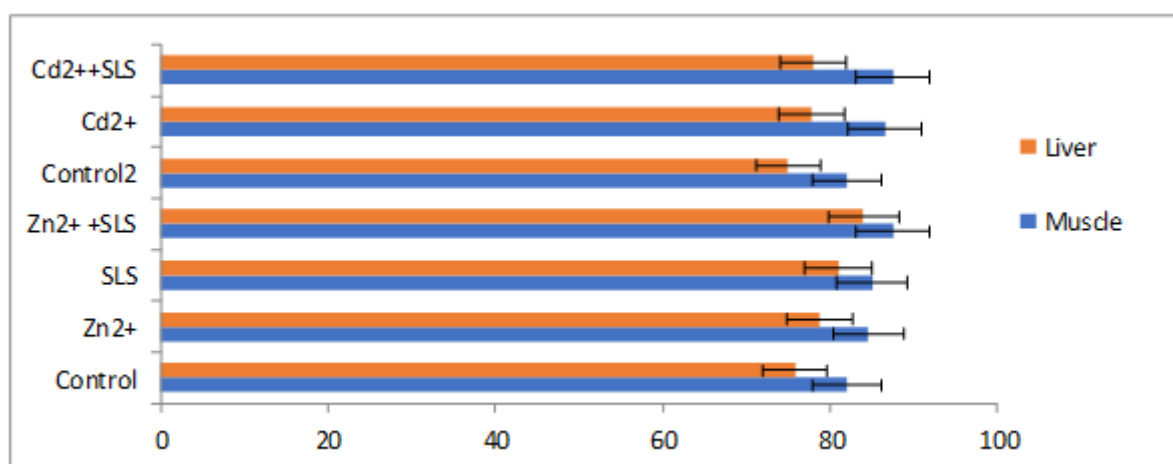


Fig. 3. Moisture content (%) in carp tissues during intoxication with heavy metals and sodium lauryl sulfate ( $M \pm m$ ,  $n=5$ )

The obtained data indicate that fish muscle tissues are least exposed to toxicants, this can be explained by the fact that the main contact organs of fish are the gills and liver.

Analysis of the results obtained during the experiment indicates implausible changes in the lipid content of the liver and white muscles on the fourteenth day under the influence of toxicants (Fig. 4).

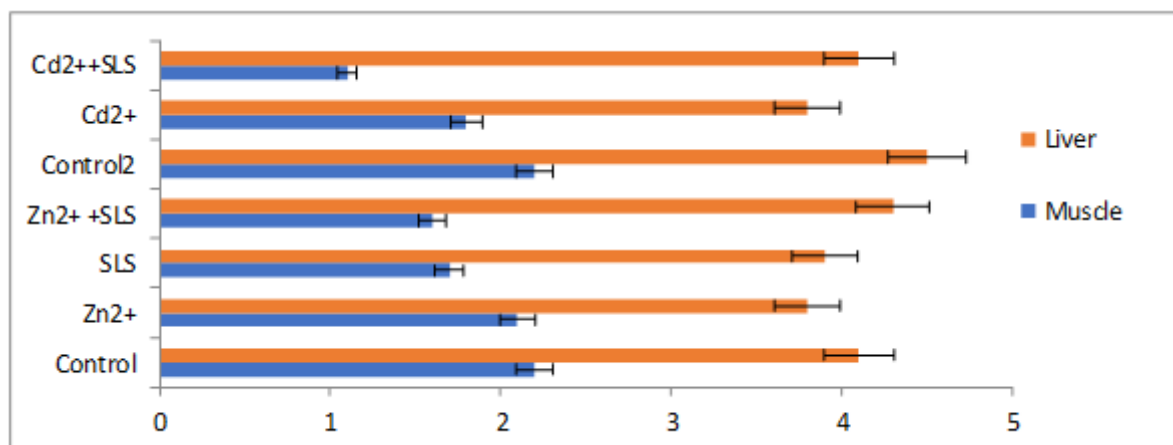


Fig. 4. Content of total lipids (g%) in carp tissues during intoxication with heavy metals and sodium lauryl sulfate ( $M \pm m$ ,  $n=5$ )

According to the results presented in Fig. 4, a decrease in lipid content was observed both in white muscles and in liver tissues under the influence of toxic environmental conditions. The exception is the indicated indicator under the simultaneous influence of sodium lauryl sulfate and lead ions. The increase in the amount of lipids in the liver can be explained by the fact that the fish organism, being on endogenous nutrition, does not use lipids as a nutritional substrate, but on the contrary, synthesizes and accumulates them at the expense of other substrates – glucose, glycogen, depleting itself energetically. At the same time, fat accumulation is observed in the liver. This may be a consequence of blocking their exit from the liver as part of lipoproteins, which can lead to fatty degeneration of the liver.

### **Conclusions**

During the experiment, changes in the appearance of the fish were observed, in particular damage to the fins and skin and scales, increased mucus secretion in carp that were in an aquarium with sodium lauryl

sulfate for 14 days. When toxicants of various origins act on the fish body, the glucose content is more sensitive than the total protein content. These indicators can be recommended for monitoring water bodies using fish of the cyprinid family. Under the influence of toxic environmental conditions, a decrease in the lipid content was observed in both white muscles and liver tissues, with the exception of the simultaneous exposure to sodium lauryl sulfate and lead ions. An increase in the amount of lipids in the liver can lead to exhaustion of the body and indicate tissue degeneration. When studying the effect of toxic substances on the moisture content in various carp tissues, no significant changes were observed. The presence of a multi-stage cell defense system, which has developed during phylogenetic development, determines the complexity of the cause-and-effect relationships between biochemical processes and their focus, primarily, on maintaining the optimal metabolic balance of the cell and the organism as a whole, which is expressed in changes in biochemical indicators.

### **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 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 / Conflicts of Interest**

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

## References

Grubinko, V. V. (2005). Integral assessment of toxic damage in biological systems. *Scientific Notes of Ternopil National Pedagogical University. Series: Biology*, (3), 111-114. (In Ukrainian)

Грубінко В. В. Інтегральна оцінка токсичного ураження у біологічних системах. *Наукові записки ТНПУ. Серія: Біологія*. 2005. № 3. С. 111–114.

Grubinko, V. V. (2005). Systemic assessment of metabolic adaptations in hydrobionts. *Scientific Notes of Ternopil National Pedagogical University. Series: Biology*, (2), 36-39. (In Ukrainian)

Грубінко В. В. Системна оцінка метаболічних адаптацій у гідробіонтів. *Наукові записки ТНПУ. Серія: Біологія*. 2005. № 2. С. 36–39.

Lowry, O., Rosebrough, N., Farr, A., & Randall, R. (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J. Biol. Chem.* 193, 265–275. [https://www.jbc.org/article/S0021-9258\(19\)52451-6/pdf](https://www.jbc.org/article/S0021-9258(19)52451-6/pdf)

Matiushko, S., & Mekhed, O. (2024). Changes in the content of adenylates in carp tissues under the action of mycotoxin T2. *Biota. Human. Technology*, (3), 78-83. <https://doi.org/110.58407/bht.3.24.5> (In Ukrainian)

Матюшко С., Мехед О. Зміни вмісту аденілатів в тканинах коропа за дії мікотоксину Т2. *Biota. Human. Technology*. 2024. № 3. С. 78-83. <https://doi.org/110.58407/bht.3.24.5>

Mekhed, O. B. (2024). Effect of T-2 mycotoxin on certain biochemical indicators of hydrobionts. *Molluscs: results, problems and perspectives of research*. Zhytomyr: Euro-Volyn, 19–21. <https://tinyurl.com/4umjzxt5> (in Ukrainian)

Мехед О. Б. Вплив мікотоксину Т2 на деякі біохімічні показники гідробіонтів. *Молюски: результати, проблеми і перспективи досліджень*. Житомир: Євро-Волинь, 2024. С. 19-21. <https://tinyurl.com/4umjzxt5>

Musiyenko, N. H., Zhidenko, A. O., Mekhed, O. B., & Kovalenko, O. M. (2005). Impact of pesticides on morphological indicators of carp. *Scientific notes of Ternopil National Pedagogical University named after Volodymyr Hnatyuk. Series: Biology*, 3(26), 319–321. <https://tinyurl.com/279a3azx> (in Ukrainian)

Мусієнко Н. Г., Жиденко А. О., Мехед О. Б., Коваленко О. М. Вплив пестицидів на морфологічні показники коропа. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Біологія*. 2005. №3(26). С.319-321. <https://tinyurl.com/279a3azx>

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. In O. Lukash, H. Tkaczenko, & Yu. Karpenko (Eds.), *Natural resources of the border areas in the conditions of climate change. The 7th International Scientific Conference: the program, abstracts (Ukraine, Chernihiv, September 27-29, 2023)* (pp. 99–100). Chernihiv. (in Ukrainian)

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

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>

Yatsenko, I. V., Bohatko, N. M., Bulgakova, N. V., Fotina, T. I., & Biben, I. A. (2017). Hygiene and expertise of food hydrobionts and their processing products. Part 1. Hygiene and expertise of fishery products: A textbook. Kharkiv (in Ukrainian)

Яценко І. В., Богатко Н. М., Букалова Н. В., Фотіна Т. І., Бібен І. А. Гігієна і експертиза харчових тваринних гідробіонтів та продуктів їх переробки. Частина 1. Гігієна і експертиза рибпромислової продукції. Харків: Діса-Плюс, 2017. 680 с.

Zhelai, M. V., Polotnianko, L. V., Yachna, M. H., Mekhed, O. B., & Tretyak, O. P. (2023). Impact of T-2 mycotoxin on ichthyological indicators of carp fish. *Scientific notes of Ternopil National Pedagogical University named after Volodymyr Hnatyuk. Series: Biology*, 84(1), 35–40. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.24.1.5> (in Ukrainian)

Желай М. В., Полотнянко Л. В., Ячна М. Г., Мехед О. Б., Третяк О. П. Вплив мікотоксину Т2 на іхтіологічні показники корошових риб. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Біологія*. 2023. Т. 84, №1. С. 35-40 <https://doi.org/10.25128/2078-2357.24.1.5>

Zhelai, M., Yachna, M., Mekhed, O., & Tretyak, O. (2023). Adaptive changes in ichthyological indicators of carp fish under the influence of T-2 mycotoxin. In O. Lukash, H. Tkaczenko, & Yu. Karpenko (Eds.), *Natural resources of the border areas in the conditions of climate change. The 7th International Scientific Conference: the program, abstracts (Ukraine, Chernihiv, September 27-29, 2023)* (pp. 77–78). Chernihiv. (in Ukrainian)

Желай М., Ячна М., Мехед О., Третяк О. Адаптивні зміни іхтіологічних показників корошових риб за дії мікотоксину Т2. *Природні ресурси прикордонних територій в умовах зміни клімату*. Чернігів : Десна-Поліграф. 2023. С. 77-78.

World Medical Association. (2013). World Medical Association Declaration of Helsinki. Ethical principles for medical research involving human subjects. *JAMA*, 310(20), 2191-2194. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>

Received: 20.02.2025. Accepted: 08.03.2025. Published: 03.04.2025.

**Ви можете цитувати цю статтю так:**

Filonenko D., Mekhed O. Assessment of the combined effect of heavy metals and surfactants on carp fish organisms. *Biota. Human. Technology*. 2025. №1. P. 40-47.

**Cite this article in APA style as:**

Filonenko, D., & Mekhed, O. (2025). Assessment of the combined effect of heavy metals and surfactants on carp fish organisms. *Biota. Human. Technology*, 1, P. 40-47.

**Information about the authors:**

**Filonenko D.** [in Ukrainian: **Філоненко Д.**] <sup>1</sup>, Ph. D. student, email: [filonenkoD@gmail.com](mailto:filonenkoD@gmail.com)

ORCID: 0009-0007-0631-1669

Department of Biology, T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”

53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

**Mekhed O.** [in Ukrainian: **Мехед О.**] <sup>2</sup>, Cand. Sc. (Biol.), D. Sc. (Pedagogics), Prof., email: [mekhedolga@gmail.com](mailto:mekhedolga@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-9485-9139 Scopus Author ID: 6506181994

ResearcherID: AAC-7333-2021

Department of Biology, T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”

53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

<sup>1</sup> Study design, data collection, statistical analysis, manuscript preparation.

<sup>2</sup> Data collection, statistical analysis, manuscript preparation.



# **FUNCTIONING OF BIOLOGICAL SYSTEMS**

**ФУНКЦІОНУВАННЯ  
БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ**







Copyright (c) 2025 Valeriia Mizin, Olena Severynovska

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/).

Валерія Мізін, Олена Севериновська

## ЕФЕКТИ КОФЕЇНУ В МОДЕЛЯХ ДЕПРЕСІЇ У САМОК ЩУРІВ



Valeriia Mizin, Olena Severynovska

## EFFECTS OF CAFFEINE IN FEMALE RAT MODELS OF DEPRESSION

## АНОТАЦІЯ

**Мета роботи.** Оцінка впливу кофеїну на поведінкові показники самок щурів, які перебувають у стані депресії, індукованої методами непередбаченого стресу та контагенозної депресії.

**Методологія.** Дослідження проведено на білих статевозрілих самках щурів вагою 230–300 г (N = 72), розділених на шість груп: інтактні; самки з депресією (методика непередбачуваного стресу); самки щурів, яким вводили кофеїн через зонд у концентрації 25 мг/кг протягом 5 тижнів; самки з депресією, яким вводили кофеїн; самки щурів з контагенозною депресією; самки щурів з контагенозною депресією, яким вводили кофеїн. Для оцінки депресивної поведінки використовувалися два валідовані методи: тест переваги цукрози та тест вимушеного плавання. Тест переваги цукрози для оцінки ангедонії. В тесті вимушеного плавання оцінювали показники знерухомлення та карабкання для оцінки безпорадної поведінки та активності стресової адаптації. Дані аналізувалися з використанням двофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA) з пост-хок тестом Тьюкі.

**Наукова новизна.** Вперше проведено порівняльне дослідження впливу кофеїну на самок щурів у двох різних моделях депресії. Отримані результати дозволили оцінити різні механізми депресивної поведінки, спричинені хронічним стресом та соціальними факторами. Аналіз дозволив визначити, що ефективність кофеїну варіюється в залежності від типу депресії.

**Висновки.** У самиць щурів в моделях непередбачуваного стресу та контагенозної депресії спостерігались прояви ангедонії, а саме зниження переваги цукрози порівняно з контрольною групою. Також спостерігалось збільшення часу нерухомості та зниження карабкання, що свідчить про формування безпорадної поведінки. Це свідчить про різні нейробіологічні механізми регуляції стресу в залежності від його природи. Кофеїн мав виражений антидепресивний ефект залежний від моделі депресії. У самиць моделі хронічного непередбачуваного стресу кофеїн викликав підвищення переваги цукрози, зниження часу знерухомлення та підвищення карабкання, проте ці показники залишалися нижчими за контрольні значення. У самиць з контагенозною депресією ефект кофеїну був більш вираженим: показники переваги цукрози і карабкання практично досягли контрольних значень. Можливо це обумовлено впливом кофеїну на соціальні та емоційні аспекти поведінки, тоді як при хронічному стресі, де зміни зачіпають складніші механізми адаптації, його вплив виявляється менш вираженим.

**Ключові слова:** щури, депресія, кофеїн, ангедонія, поведінкові реакції

## ABSTRACT

**Purpose of the research.** Assessment of the effect of caffeine on behavioral indicators of female rats in a state of depression induced by methods of unpredictable stress and contagious depression.

**Methodology.** The study was conducted on white sexually mature female rats weighing 230–300 g (N = 72), divided into six groups: intact; females with depression (method of unpredictable chronic stress); female rats that were given caffeine via gavage at a concentration of 25 mg/kg for 5 weeks; females with depression that were given caffeine; female rats with contagious depression; female rats with contagious depression that were given caffeine. Two validated methods were used to assess depressive behavior: the sucrose preference test and the forced swim test. The sucrose preference test was used to determine anhedonia. The forced swim test evaluated immobilization and climbing to assess helpless behavior and stress adaptation activity. Data were analyzed using a two-way analysis of variance (ANOVA) with Tukey's post hoc test.

**Scientific novelty.** For the first time, a comparative study of the effect of caffeine on female rats in two different models of depression was conducted. The results obtained allowed us to evaluate different mechanisms of depressive

behavior caused by chronic stress and social factors. The analysis allowed us to determine that the effectiveness of caffeine varies depending on the type of depression.

**Conclusions.** In female rats in models of unpredictable stress and contagious depression, manifestations of anhedonia were observed, namely, a decrease in sucrose preference compared to the control group. An increase in immobility time and a decrease in climbing were also observed, which indicates the formation of helpless behavior. This shows different neurobiological mechanisms of stress regulation depending on its nature. Caffeine had a pronounced antidepressant effect depending on the model of depression. In females in the model of chronic unpredictable stress, caffeine caused an increase in sucrose preference, a decrease in immobilization time, and an increase in climbing. Still, these indicators remained lower than control values. In females with contagious depression, the effect of caffeine was more pronounced: indicators of sucrose preference and climbing almost reached control values. This may be due to the impact of caffeine on social and emotional aspects of behavior. At the same time, in chronic stress, where changes affect more complex adaptation mechanisms, its effect is less pronounced.

**Key words:** rats, depression, caffeine, anhedonia, behavioral reactions

## Постановка проблеми

Останніми роками спостерігається зростання інтересу вивчення впливу кофеїну на афективні розлади, включаючи депресію. Ряд досліджень вказує на його потенційний антидепресивний ефект (Okeowo et al., 2023; Sharma et al., 2023), що може бути пов'язано з тим, що кофеїн є одним із найбільш поширених психостимуляторів у світі та володіє вираженими нейромодуючими властивостями (Pareek et al., 2024). Його основний механізм дії пов'язаний з антагонізмом аденозинових рецепторів, що призводить до підвищеної активності нейронів та посилення дофамінергічної та норадренергічної передачі в центральній нервовій системі (Ferre et al., 2008; Sharma et al., 2023). Однак вплив кофеїну на стрес-індуковані та соціально-обумовлені моделі депресії залишається недостатньо вивченим.

Депресія є одним з найбільш поширених психічних розладів, що торкається близько 280 мільйонів людей по всьому світу (World Health Organization, 2023). Незважаючи на широкий спектр доступних антидепресантів, багато пацієнтів демонструють стійкість до терапії, що наголошує на необхідності пошуку альтернативних стратегій лікування (Zeldetz et al., 2018). Експериментальні моделі депресії на тваринах відіграють ключову роль у вивченні механізмів розладу та пошуку нових терапевтичних методів (Planchet et al., 2019).

Для вивчення депресії у гризунів розроблено кілька валідованих моделей, які відтворюють різні аспекти захворювання. Найбільш актуальною є модель непередбаченого хронічного стресу (Unpredictable Chronic Stress, UCS). Модель широко застосовується для індукції депресивного стану у

тварин, моделюючи вплив хронічних стресових факторів, що веде до поведінкових та нейробіологічних змін, аналогічних до депресії у людини (Willner, 2016; Harro, 2019). Ця модель включає вплив непередбачуваних стресорів (обмеження руху, соціальна ізоляція, зміна світлового режиму та ін.), що призводить до пригніченої поведінки, зниження мотивації та порушень нейротрансмісії (Lu et al., 2019).

Не можна забувати про соціальний аспект депресії та її контагенний ефект. Тому використання моделі контагенної депресії дозволяє оцінити перенесення соціального негативного емоційного стану від однієї тварини до іншої (Boucka et al., 2015). Дослідження показують, що щури, що зазнали стресу, можуть передавати депресивноподібну поведінку своїм сусідам, що моделює соціальний аспект поширення депресії у людей (Sterley et al., 2018). Цей феномен пов'язаний із змінами в лімбічній системі мозку, зокрема, в амігдалі та префронтальній корі (Unal, 2018).

Обидві моделі дозволяють досліджувати різні аспекти депресивної поведінки, у тому числі втрату мотивації та ангедонію, що робить їх цінними інструментами для тестування потенційних терапевтичних агентів.

Для кількісної оцінки депресивної поведінки доречним є використання класичних поведінкових тестів, таких як тест вимушеного плавання (Forced Swim Test, FST) та тест на перевагу цукрози (Sucrose Preference Test, SPT). В ході теста вимушеного плавання реєструються показники нерухомості, що відображають ступінь поведінкової безпорадності, а також карабкання, яке може бути індикатором активних копінг-стратегій та впливу психостимуляторів, таких як кофеїн (Primo et al., 2023;

Slattery & Cryan, 2017). SPT використовується для оцінки ангедонії – одного з ключових симптомів депресії, що характеризується зниженням здатності відчувати задоволення (Willner, 2017).

Актуальність цього дослідження зумовлена необхідністю більш детального вивчення ролі кофеїну в регуляції поведінкових реакцій при депресивних станах, спричинених різними стресовими факторами. Важливо розуміти, як він впливає на поведінкові реакції в експериментальних моделях депресії, особливо з урахуванням його потенційного терапевтичного або шкідливого впливу (Okeowo et al., 2023). Вивчення впливу кофеїну саме на самках щурів обумовлено тим, що самки демонструють велику сприйнятливості до стресу та депресивних станів у порівнянні з самцями, що пов'язано з коливаннями рівня статевих гормонів (Bangasser & Cuarenta, 2021). Крім того, у клінічних дослідженнях депресія у жінок діагностується частіше, ніж у чоловіків, що наголошує на необхідності вивчення статевих відмінностей у відповіді на стрес та можливі терапевтичні втручання (Kokras & Dalla, 2014).

**Мета дослідження** – оцінка впливу кофеїну на поведінкові показники самок щурів, які перебувають у стані депресії, індукованої методами непередбаченого стресу та контагенозної депресії.

#### Матеріали та методи дослідження

Дослідження проводили на білих статевозрілих щурах самок вагою 230–300 г. Маніпуляції з тваринами проводилися відповідно до положень «Європейської конвенції про захист хребетних тварин, які використовують для експериментів та інших наукових цілей» (Страсбург, 2005), Закон України «Про охорону тварин від жорстокого поводження» (2006, ст. 26) та «Загальних етичних принципів експериментів на тваринах», ухвалених П'ятим національним конгресом з біоетики (Київ, 2013).

Було сформовано шість дослідницьких груп: I – інтактні, (n=12); II – самки щурів з депресією (методика непередбаченого стресу), (n=12); III – самки, яким вводили кофеїн через зонд у концентрації 25 мг/кг протягом 5 тижнів (кофеїн-бензоат натрію ЗАТ «Дарниця»), (n=12); IV – самки щурів з депресією, яким вводили кофеїн через зонд у концентрації 25 мг/кг протягом 5 тижнів,

(n=12); V – самки з контагенозною депресією, (n=12); VI – самки щурів із контагенозною депресією, яким вводили кофеїн через зонд у концентрації 25 мг/кг протягом 5 тижнів, (n=12). Використовували модель хронічного непередбачуваного стресу протягом 5 тижнів для моделювання депресії у самок щурів. При моделюванні депресії обирали 2 стресові фактори у випадковому порядку. Для моделювання тварин з контагенозною депресією в клітину до інтактних тварин додавали щурів із встановленою депресією у співвідношенні 1:2 відповідно (протягом 5 тижнів). Для оцінки розвитку у них контагенозної депресії тварин піддавали тесту на перевагу цукрози (Boyko et al., 2015; Zeldetz et al., 2018).

У дослідженні використовували валідовані поведінкові методики: тест вимушеного плавання (Forced Swim Test) та тест на перевагу цукрози (Sucrose Preference Test) (Unal & Canbeyli, 2019).

У тесті FST аналізували два ключові показники:

Карабкання (climbing) – активні спроби вибратися з води, асоційовані з рівнем норадренергічної активності.

Нерухомість (immobility) – пасивна поведінка тварини, що вказує на стан безпорадності та депресивного зниження мотивації (Harro, 2019).

Статистичний аналіз здійснювався у SPSS 27.0. Нормальність розподілу перевіряли за тестом Шапіро-Уїлка, гомогенність дисперсій – тестом Левена. Використовували двофакторний дисперсійний аналіз (Two-way ANOVA). При виявленні значних ефектів ( $p < 0.05$ ) проводився пост-хок тест Тьюкі (Tukey HSD). Результати представлені у вигляді  $M \pm m$ , статистична значимість встановлювалася при  $p < 0.05$ .

#### Результати дослідження

Для оцінки впливу кофеїну на поведінкові показники самок щурів з депресією (модель хронічного непередбачуваного стресу та контагенозна) провели двофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA) з пост-хок тестом Тьюкі. Кожна з шести експериментальних груп включала 12 незалежних спостережень.

Для визначення рівня ангедонії, як маркера депресивного стану у щурів ми провели тест на перевагу цукрози. Тваринам пропонували вибір між водою та розчином

цукрози; зменшення споживання розчину з цукрозою може свідчити про депресивний стан.

Самки контрольної групи споживали достатню кількість розчину цукрози ( $33,1 \pm 1,1$  мл), що свідчить про високий рівень мотивації до отримання винагороди (рис. 1). У самиць-щурів групи зі стрес-індукованою депресією спостерігалось вірогідне зниження споживання цукрозного

розчину ( $F(2,67) = 512,42, 9,1 \pm 0,8, p < 0.0001, \eta^2 = 0,55$ ) порівняно з контролем, що свідчить про ознаку депресивного стану – ангедонію. Ще більш виражене зниження показника споживання розчину цукрози спостерігалось у самиць моделі контагеннозної депресії ( $F(2,67) = 512,42, 8,2 \pm 0,7, p < 0,0001, \eta^2 = 0,55$ ), що може свідчити про особливо значущі механізми соціальної передачі депресії.

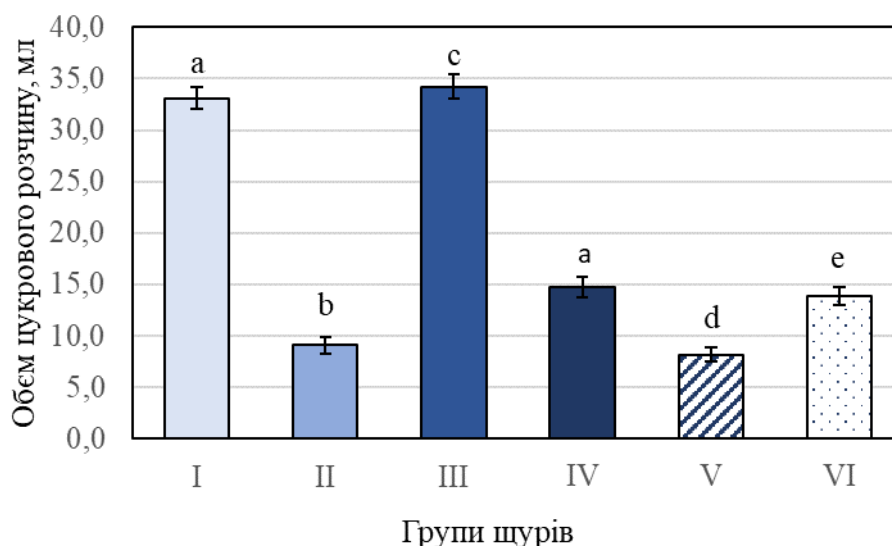


Рис. 1. Показники об'єму спожитого розчину цукрози в тесті «Перевага до цукрози», ( $M \pm m$ )

**Примітка:** за віссю абсцис позначені групи щурів: I – інтактні; II – тварини з депресією (методика непередбачуваного стресу); III – самки, яким вводили кофеїн через зонд у концентрації 25 мг/кг протягом 5 тижнів (кофеїн-бензоат натрію ЗАТ «Дарниця»); IV – самки з депресією, яким вводили кофеїн через зонд у концентрації 25 мг/кг протягом 5 тижнів; V – самки з контагенною депресією; VI – самки з контагенною депресією, яким вводили кофеїн через зонд у концентрації 25 мг/кг протягом 5 тижнів. За віссю ординат – час рухової активності, с. Групи, позначені різними літерами (a, b, c, d, e), статистично достовірно відрізняються між собою, при  $p < 0,05$ . Групи, що позначені однаковою літерою, не мають статистично значущих відмінностей, при  $p < 0,05$  (ANOVA з тестом Тьюкі)

В групі самиць, яким щодня через зонд вводили кофеїн спостерігали вірогідне підвищення споживання цукрозного розчину ( $F(1,67) = 185,63, 34,2 \pm 1,2, p < 0,0001, \eta^2 = 0,30$ ) порівняно з контрольними тваринами. Тобто, кофеїн мав стимулюючий ефект на рівень мотивації та задоволення.

Кофеїн знизив прояви ангедонії у самиць з депресією викликану непередбачуваним стресом ( $F(2,67) = 67,29, 14,7 \pm 1,0, p < 0,0001, \eta^2 = 0,19$ ) відносно показників щурів з депресією. Подібні результати ( $F(2,67) = 67,29, 13,9 \pm 0,9, p < 0,0001, \eta^2 = 0,19$ ) були характерні самка з контагенною депресією. Що вказує на вірогідне часткове

відновлення мотивації та жаги до винагороди під впливом кофеїну.

Депресивноподібну поведінку у тварин оцінювали за валідованою методикою вимушеного плавання. Проаналізували показники часу карабкання та нерухомості, що відображають механізми депресії різних моделей та впливу психомоторних речовин.

У самиць контрольної групи час карабкання склав  $74,3 \pm 2,1$  с (рис. 2). В групі самиць моделі хронічного непередбачуваного стресу вірогідно знизився час карабкання ( $F(2,67) = 284,05, 34,8 \pm 1,9, p < 0,0001, \eta^2 = 0,48$ ) відносно контрольної групи. Такі значення свідчать про зни-

ження норадренергичної активності, що є проявом порушення мотивації (Slattery & Cryan, 2019). Подібне зниження показника карабкання спостерігалось в групі з

контагенозною депресією ( $F(2,67) = 284,05, 36,4 \pm 2,3, p < 0,0001, \eta^2 = 0,48$ ), де щури підвергались соціальному впливу депресивних тварин.

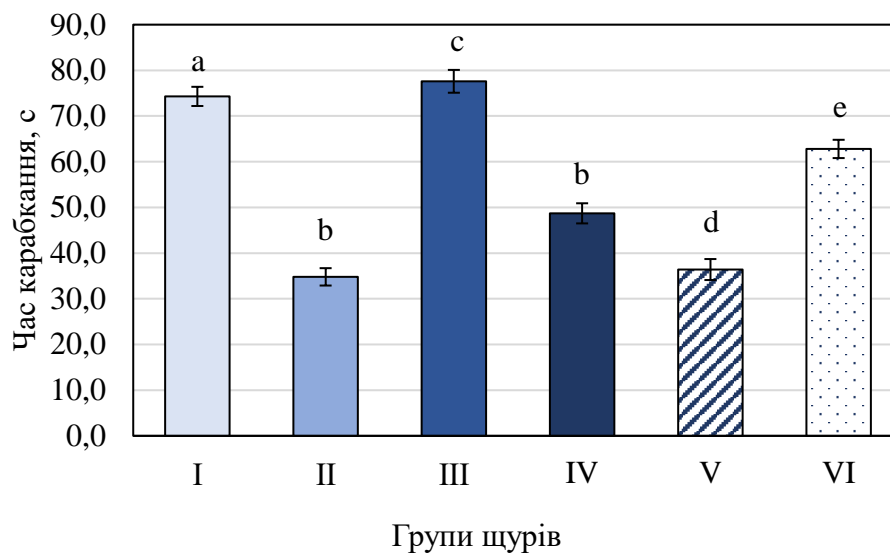


Рис. 2. Показники часу карабкання щурів в методиці «Вимушене плавання», ( $M \pm m$ )

Примітка: позначення ті ж самі, що на рис. 1

Показник часу карабкання суттєво не відрізнявся від контрольних значень ( $F(1,67) = 327,58, 77,6 \pm 2,5, p < 0,0001, \eta^2 = 0,28$ ), що підтверджує відсутність значущого впливу кофеїну на поведінку тварин без депресивних симптомів. Однак в групі самиць з стрес-індукованою депресією кофеїн викликав вірогідне збільшення часу карабкання ( $F(2,67) = 106,22, 48,7 \pm 2,2, p < 0,0001, \eta^2 = 0,18$ ) відносно тварин з депресією, що свідчить про часткове відновлення норадренергичної активності. Найбільш виражений ефект кофеїну спостерігався в групі тварин з контагенозною депресією ( $F(2,67) = 106,22, 62,8 \pm 2,0, p < 0,0001, \eta^2 = 0,18$ ), де суттєво збільшився показник відносно групи самиць з контагенозною депресією. Це може свідчити про підвищення чутливості до моделюючого ефекту кофеїну в умовах соціального стресу.

Для оцінки стану рухової активності та наявності безпорадної поведінки оцінили показник часу нерухомості самок щурів всіх груп. В контрольній групі самиць середній показник нерухомості складав  $54,1 \pm 2,3$ , що свідчить про базовий рівень

поведінки та збереження рухової активності при стресовому плаванні (рис. 3).

В кожній з моделей депресії показник нерухомості вірогідно збільшився. У самиць з депресією викликану хронічним непередбачуваним стресом показник нерухомості вірогідно найвищий ( $F(2,67) = 462,31, 113,2 \pm 2,8, p < 0,0001, \eta^2 = 0,53$ ) серед усіх груп щурів. В групі тварин з контагенозною депресією показник ( $F(2,67) = 462,31, 62,1 \pm 2,5, p < 0,0001, \eta^2 = 0,53$ ) був збільшеним, що свідчить про пригнічений стан та зниження рівня мотивації.

Показники нерухомості у самиць кофеїнової групи ( $F(1,67) = 215,47, 50,3 \pm 2,1, p < 0,0001, \eta^2 = 0,32$ ) подібні до показників контрольних тварин.

Самицям зі стрес-індукованою депресією, яким через зонд вводили кофеїн властиве зменшення часу нерухомості ( $F(2,67) = 84,92, 85,4 \pm 2,6, p < 0,0001, \eta^2 = 0,21$ ) відносно показників депресивної групи. В групі контагенозної депресії та кофеїну ( $F(2,67) = 84,92, 52,3 \pm 2,4, p < 0,0001, \eta^2 = 0,21$ ) наявне зниження показника нерухомості до значень контрольних самиць.

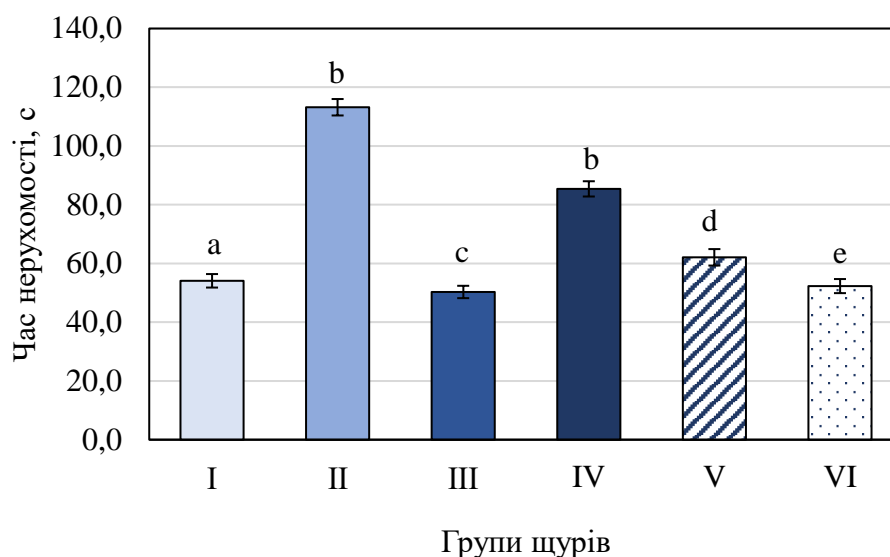


Рис. 3. Показники часу нерухомості щурів в методиці «Вимушене плавання», (M±m)

Примітка: позначення ті ж самі, що на рис. 1.

Депресія будь-якого генезу викликає значне підвищення часу нерухомості самок щурів в тесті вимушеного плавання, що свідчить про розвиток беспорядної поведінки. В свою чергу кофеїн знижує даний показник. Найбільший ефект кофеїну помітний в моделях контагенозної депресії, де показник нерухомості повністю нормалізується ( $p > 0.05$  відносно контролю). Різниця впливу кофеїну на моделі депресії підтверджена статистично значущою взаємодією факторів «Тип депресії» x «Кофеїн» ( $F(2,67) = 84,92$ ,  $p < 0,0001$ ,  $\eta^2 = 0,21$ ).

### Обговорення

Результати тесту переваги сахарози показали, що щури з хронічною непередбаченою депресією та контагенозною депресією демонстрували значне зниження споживання цукрозного розчину порівняно з контрольною групою (II група:  $9,1 \pm 0,8$ ; V група:  $8,2 \pm 0,7$  та I група:  $33,1 \pm 1,1$ ). Цей ефект підтверджує розвиток ангедонії, що є однією з ключових ознак депресії у тварин та людини (Willner, 2017). Дані узгоджуються з роботами, які демонструють, що тривалий вплив стресових факторів знижує активність дофамінергічної системи та послаблює мотиваційні реакції (Hollis et al., 2022).

У тесті вимушеного плавання у депресивних щурів відзначалося збільшення показника знерухомлення та зниження карабкання, що відповідає формуванню беспорядної поведінки. У групі з хронічним

непередбачуваним стресом показник нерухомості був максимальним ( $113,2 \pm 2,8$ ), а карабкання – мінімальним ( $34,8 \pm 1,9$ ), що підтверджує гіпофункцію норадренергічної системи та дефіцит стресової адаптації (Planchez et al., 2019). У групі з контагенозною депресією, також відзначалося збільшення нерухомості ( $62,1 \pm 2,5$ ) та зниження карабкання ( $36,4 \pm 2,3$ ), проте ці зміни були менш виражені в порівнянні з групою моделі хронічного непередбачуваного стресу. Це може свідчити про більш м'який характер депресивних змін при соціально індукованій депресії, що узгоджується з даними про соціальну модуляцію депресивного стану у гризунів (Slavich & Sacher, 2019).

Кофеїн продемонстрував антидепресивну дію в обох моделях депресії, проте рівень його ефективності залежав від типу депресії. У кофеїновій групі (без депресії) не спостерігалось значних змін порівняно з контролем ( $34,2 \pm 1,2$  та  $33,1 \pm 1,1$ ,  $p > 0,05$ ), що підтверджує його відсутність ефекту у здорових тварин.

У групі депресивних тварин, що отримували кофеїн відзначалося помірне підвищення переваги цукрози ( $14,7 \pm 1,0$ ,  $p < 0,001$ ), а також зниження знерухомлення ( $85,4 \pm 2,6$ ) та підвищення карабкання ( $48,7 \pm 2,2$ ) порівняно з групою з хронічним непередбачуваним стресом. Однак, незважаючи на цей ефект, показники залишалися значно нижчими за контрольні значення, що вказує на неза-



вершене відновлення поведінкових функцій. Цей факт узгоджується з гіпотезами про те, що кофеїн покращує стресову адаптацію через модуляцію аденозинергічної та моноамінергічної систем, але його ефект може бути обмежений при важких формах депресії (Ferre et al., 2008).

Найбільш виражений вплив кофеїну спостерігався в групі щурів з контагенозною депресією під впливом кофеїну, де перевага сахарози ( $13,9 \pm 0,9$ ) і карабкання ( $62,8 \pm 2,0$ ) практично повністю нормалізувалися ( $p > 0,05$  щодо контролю), а показник нерухомості значно знизився ( $52,3 \pm 0,4$ ). Це може вказувати на те, що кофеїн ефективніший в умовах контагенозної депресії, можливо, через особливості соціального регулювання стресу та чутливість до стимуляції норадренергічної системи (Wang et al., 2022).

Антидепресивна дія кофеїну, ймовірно, пов'язана з його блокадою аденозинових A2A-рецепторів, що призводить до посилення вивільнення дофаміну та норадреналіну (Ferré et al., 2008). Вплив кофеїну також може бути зумовлений його взаємодією з гіпоталамо-гіпофізарно-наднирничковою (НРА) віссю, знижуючи рівень кортикостерону та зменшуючи вираженість стресової реакції (Nerman et al., 2016).

Додатковим фактором може бути його вплив на нейрогенез у гіпокампі, який часто пригнічується під час хронічного

стресу. Дослідження на гризунах показують, що кофеїн здатний збільшувати нейрогенез у зубчастій звивині гіпокампу, що корелює з покращенням когнітивних та емоційних функцій (Okeowo et al., 2023).

### **Висновки**

У самиць щурів у моделях хронічного непередбачуваного стресу та контагенозної депресії спостерігаються виражені зміни поведінкових показників, що проявляються розвитком ангедонії (зниженням переваги до розчину цукрози) та безпорадної поведінки, яка характеризується збільшенням часу знерухомлення та зменшенням активності карабкання.

Кофеїн чинить виражений антидепресивний ефект, що проявляється покращенням поведінкових показників, зменшенню тривожності та підвищенню рухової активності, що допомагає тваринам обох моделей депресії краще адаптуватися до стресових умов. Особливо виражена дія кофеїну в групі самиць з контагенозною депресією, де показники поведінки практично повністю нормалізуються, що свідчить про високий вплив на соціальні та емоційні аспекти поведінки. Вплив кофеїну на поведінку при хронічній депресії виражений слабкіше, що може свідчити про різні нейробіологічні механізми регуляції стресу в залежності від його природи.

### **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 Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара (№ протоколу: 3 від 06 листопада 2020 р., Дніпро, Україна) / The experimental procedures were approved by the Bioethics Commission of Oles Honchar Dnipro National University (Protocol Number: 3, 06 November 2020, Dnipro, Ukraine).

### **Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement**

Не застосовується / Not applicable.

### **Конфлікт інтересів / Conflict of interest**

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

## References

- Bangasser, D. A., & Cuarenta, A. (2021). Sex differences in anxiety and depression: circuits and mechanisms. *Nature reviews. Neuroscience*, 22(11), 674–684. <https://doi.org/10.1038/s41583-021-00513-0>
- Boyko, M., Kutz, R., Grinshpun, Yu., Zvenigorodsky, V., Gruenbaum, Sh. E., Gruenbaum, B. F., Brotfain, E., Shapira, Y., & Zlotnik, A. (2015) Establishment of an animal model of depression contagion. *Behavioral Brain Research*, 0, 358–363. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2014.12.017>
- Ferre, S., Ciruela, F., Borycz, J., Solinas, M., Quarta, D., Antoniou, K., Quiroz, C., Justinova, Z., Lluís, C., Franco, R., & Goldberg, S. R. (2008). Adenosine A1-A2A receptor heteromers: new targets for caffeine in the brain. *Frontiers in bioscience: a journal and virtual library*, 13, 2391–2399. <https://doi.org/10.2741/2852>
- Harro, J. (2019). Animal models of depression: pros and cons. *Cell and Tissue Research*, 377, 5–20. <https://doi.org/10.1007/s00441-018-2973-0>
- Herman, J. P., McKlveen, J. M., Ghosal, S., Kopp, B., Wulsin, A., Makinson, R., Scheimann, J., & Myers, B. (2016). Regulation of the Hypothalamic-Pituitary-Adrenocortical Stress Response. *Comprehensive Physiology*, 6(2), 603–621. <https://doi.org/10.1002/cphy.c150015>
- Kokras, N., & Dalla, C. (2014). Sex differences in animal models of psychiatric disorders. *British journal of pharmacology*, 171(20), 4595–4619. <https://doi.org/10.1111/bph.12710>
- Lu, Q., Mouri, A., Yang, Y., Kunisawa, K., Teshigawara, T., Hirakawa, M., Mori, Y., Yamamoto, Y., Libo, Z., Nabeshima, T., & Saito, K. (2019). Chronic unpredictable mild stress-induced behavioral changes are coupled with dopaminergic hyperfunction and serotonergic hypofunction in mouse models of depression. *Behavioural brain research*, 372, 112053. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2019.112053>
- Okeowo, O. M., Oke, O. O., David, G. O., & Ijomone, O. M. (2023). Caffeine Administration Mitigates Chronic Stress-Induced Behavioral Deficits, Neurochemical Alterations, and Glial Disruptions in Rats. *Brain sciences*, 13(12), 1663. <https://doi.org/10.3390/brainsci13121663>
- Pareek, V., Shah, S., Sharma, B., Kumar, S., & Sharma, L. (2024). Coffee and the brain: A comprehensive review of its neurological and psychiatric effects. *Journal of the Indian Academy of Geriatrics*, 20(1), 34–39. [https://doi.org/10.4103/jiag.jiag\\_53\\_23](https://doi.org/10.4103/jiag.jiag_53_23)
- Planchez, B., Surget, A., & Belzung, C. (2019). Animal models of major depression: drawbacks and challenges. *Journal of neural transmission (Vienna, Austria: 1996)*, 126(11), 1383–1408. <https://doi.org/10.1007/s00702-019-02084-y>
- Primo, M. J., Fonseca-Rodrigues, D., Almeida, A., Teixeira, P. M., & Pinto-Ribeiro, F. (2023). Sucrose preference test: A systematic review of protocols for the assessment of anhedonia in rodents. *European neuropsychopharmacology: the journal of the European College of Neuropsychopharmacology*, 77, 80–92. <https://doi.org/10.1016/j.euroneuro.2023.08.496>
- Sharma, V., Sharma, A., Verma, K., Gaur, P., Kaushik, R., & Abdali, B. (2023). A comprehensive review on pharmacological potentials of caffeine. *Journal of Applied Pharmaceutical Sciences and Research*, 6(3), 16–26. <https://doi.org/10.31069/japsr.v6i3.04>
- Slattery, D. A., & Cryan, J. F. (2017). Modelling depression in animals: at the interface of reward and stress pathways. *Psychopharmacology*, 234(9-10), 1451–1465. <https://doi.org/10.1007/s00213-017-4552-6>

Slavich, G. M., & Sacher, J. (2019). Stress, sex hormones, inflammation, and major depressive disorder: Extending Social Signal Transduction Theory of Depression to account for sex differences in mood disorders. *Psychopharmacology*, 236(10), 3063–3079. <https://doi.org/10.1007/s00213-019-05326-9>

Sterley, T. L., Baimoukhametova, D., Füzesi, T., Zurek, A. A., Daviu, N., Rasiah, N. P., Rosenegger, D., & Bains, J. S. (2018). Social transmission and buffering of synaptic changes after stress. *Nature neuroscience*, 21(3), 393–403. <https://doi.org/10.1038/s41593-017-0044-6>

Unal, G., & Canbeyli, R. (2019). Psychomotor retardation in depression: A critical measure of the forced swim test. *Behavioural Brain Research*. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2019.112047>

Wang, Y. B., Song, N. N., Ding, Y. Q., & Zhang, L. (2022). Neural plasticity and depression treatment. *IBRO Neuroscience Reports*, 14, 160–184. <https://doi.org/10.1016/j.ibneur.2022.09.001>

Willner P. (2016). The chronic mild stress (CMS) model of depression: History, evaluation and usage. *Neurobiology of stress*, 6, 78–93. <https://doi.org/10.1016/j.ynstr.2016.08.002>

Zeldetz, V., Natanel, D., Boyko, M., Zlotnik, A., Shiyntum, H. N., Grinshpun, J., Frank, D., Kuts, R., Brotfain, E., & Peiser, J. (2018). A new method for inducing a depression-like behavior in rats. *Journal of Visualized Experiments*, (132), e57137. <https://doi.org/10.3791/57137>

Received: 28.02.2025. Accepted: 15.03.2025. Published: 03.04.2025.

**Ви можете цитувати цю статтю так:**

Мізін В., Севериновська О. Ефекти кофеїну в моделях депресії у самок щурів. *Biota. Human. Technology*. 2025. №1. С. 49-57.

**Cite this article in APA style as:**

Mizin, V., & Severynovska, O. (2025). Effects of caffeine in female rat models of depression. *Biota. Human. Technology*, 1, P. 49-57. (in Ukrainian)

**Information about the authors:**

**Mizin V.** [*in Ukrainian: Мізін В.*] <sup>1</sup>, Ph.D. student, email: valeriyamv@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0786-6099

ResearcherID: U-6798-2017

Department of Biochemistry and Physiology, Oles Honchar Dnipro National University  
72 Nauky Avenue, Dnipro, 49010, Ukraine

**Severynovska O.** [*in Ukrainian: Севериновська О.*] <sup>2</sup>, Dr. of Biol. Sc., Prof., email: eseverinovskaya@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0002-1237

Scopus-Author ID: 57209410827

ResearcherID: X-7379-2018

Department of Biochemistry and Physiology, Oles Honchar Dnipro National University  
72 Nauky Avenue, Dnipro, 49010, Ukraine

<sup>1</sup> Data collection, statistical analysis, manuscript preparation.

<sup>2</sup> Study design, manuscript preparation.



**MAN AND HIS HEALTH**  
ЛЮДИНА ТА ЇЇ ЗДОРОВ'Я



UDC 616.15

DOI: 10.58407/bht.1.25.5



Copyright (c) 2025 Małgorzata Gradziuk, 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/).**Małgorzata Gradziuk, Halina Tkaczenko, Natalia Kurhaluk****WYZWANIA I MOŻLIWOŚCI W TWORZENIU SZTUCZNEJ KRWI****Małgorzata Gradziuk, Halina Tkaczenko, Natalia Kurhaluk****CHALLENGES AND OPPORTUNITIES  
IN ARTIFICIAL BLOOD****STRESZCZENIE**

**Cel pracy:** Celem niniejszej pracy jest przedstawienie aktualnego stanu badań nad sztuczną krwią, jej potencjalnymi zastosowaniami klinicznymi oraz przyszłymi kierunkami rozwoju. Problem niedoboru krwi w bankach krwi oraz rosnące zapotrzebowanie na transfuzje stanowią istotne wyzwanie dla współczesnej medycyny. W związku z tym, naukowcy na całym świecie podejmują próby opracowania skutecznych substytutów krwi, które mogłyby pełnić rolę transportera tlenu w organizmie oraz ograniczyć zależność od tradycyjnych dawców. W pracy omówiono różne strategie syntezy sztucznej krwi, uwzględniając postępy w zakresie biotechnologii, inżynierii biomedycznej oraz nanotechnologii. Szczególny nacisk położono na badania nad nośnikami hemoglobiny oraz syntetycznymi erytrocytami.

**Metody wykorzystania źródeł literaturowych.** Aby uzyskać rzetelne i kompleksowe informacje dotyczące rozwoju substytutów krwi, dokonano przeglądu dostępnej literatury naukowej, obejmującego bazy danych takie jak PubMed, Scopus, Web of Science oraz Google Scholar. Analizowane źródła obejmowały artykuły naukowe, raporty z badań klinicznych, przeglądy systematyczne oraz doniesienia o najnowszych technologiach w dziedzinie inżynierii biomedycznej. W pracy omówiono różne typy substytutów krwinek czerwonych, koncentrując się na hemoglobinie izolowanej z różnych źródeł (np. hemoglobina rekombinowana, hemoglobina bezkręgowców), syntetycznych mikrocząsteczkach naśladujących erytrocyty oraz nowoczesnych nośnikach tlenowych. Szczególną uwagę poświęcono wynikom badań klinicznych, które dostarczają informacji na temat bezpieczeństwa, skuteczności i potencjalnych ograniczeń tych rozwiązań.

**Nowatorstwo naukowe.** Artykuł wnosi istotny wkład w rozwój wiedzy na temat sztucznej krwi, prezentując kompleksowe spojrzenie na jej potencjał oraz wyzwania związane z jej zastosowaniem w praktyce klinicznej. Podkreślono kluczowe kwestie, takie jak skuteczność substytutów krwi w porównaniu z naturalną krwią ludzką, ich biodostępność, stabilność oraz możliwe skutki uboczne. Ponadto, zwrócono uwagę na koszty produkcji oraz stopień akceptacji tego rodzaju produktów przez środowisko medyczne i pacjentów. W pracy wskazano również na konieczność dalszych badań oraz rozwoju innowacyjnych technologii, które mogą przyczynić się do zwiększenia dostępności i bezpieczeństwa sztucznej krwi. Omówiono także potencjalne kierunki przyszłych badań, takie jak wykorzystanie nanotechnologii, bioinżynierii oraz biomateriałów do opracowania bardziej efektywnych i bezpiecznych substytutów krwi.

**Wnioski.** Rozwój sztucznych substytutów krwinek czerwonych może stać się przełomem w medycynie ratunkowej oraz w sytuacjach, w których tradycyjne transfuzje są niemożliwe lub utrudnione (np. w warunkach pola walki, klęsk żywiołowych, w miejscach o ograniczonym dostępie do krwi). Pomimo wieloletnich badań i postępu technologicznego, wiele substytutów krwi napotyka na trudności związane z ograniczoną stabilnością, potencjalną toksycznością oraz zdolnością do efektywnego transportu tlenu. Istniejące produkty, które przeszły testy kliniczne, wykazują obiecujące właściwości, jednak wciąż pozostają dalekie od pełnego zastąpienia naturalnej krwi. Wyniki badań wskazują, że dalsze prace nad udoskonaleniem sztucznej krwi powinny koncentrować się na poprawie bezpieczeństwa, wydłużeniu okresu przechowywania oraz optymalizacji kosztów produkcji. Perspektywy w tej dziedzinie są obiecujące, a przyszłe osiągnięcia mogą zrewolucjonizować leczenie pacjentów wymagających transfuzji krwi oraz przyczynić się do poprawy dostępności opieki zdrowotnej na całym świecie.

**Słowa kluczowe:** sztuczna krew, substytuty krwi, zastosowania kliniczne, nośniki hemoglobiny, tlenowe środki terapeutyczne, perfluorowęglowodory (PFC), nośniki tlenu na bazie hemoglobiny

## ABSTRACT

**Purpose:** The aim of this study is to present the current state of research on artificial blood, its potential clinical applications and future directions for development. The shortage of blood in blood banks and the increasing demand for transfusions is a major challenge for modern medicine. As a result, scientists worldwide are working to develop effective blood substitutes that could act as oxygen carriers in the body and reduce dependence on traditional donors. This study discusses various strategies for synthesising artificial blood, taking into account advances in biotechnology, biomedical engineering and nanotechnology. Particular emphasis is placed on research into haemoglobin carriers and synthetic erythrocytes.

**Materials and methods.** To obtain reliable and comprehensive information on the development of blood substitutes, a review of the available scientific literature was conducted, including databases such as PubMed, Scopus, Web of Science and Google Scholar. Sources analysed included scientific articles, clinical trial reports, systematic reviews and reports on the latest technologies in biomedical engineering. The study discusses different types of red blood cell substitutes, focusing on haemoglobin isolated from different sources (e.g. recombinant haemoglobin, invertebrate haemoglobin), synthetic microparticles that mimic erythrocytes, and modern oxygen carriers. Special attention has been given to the results of clinical trials that provide information on the safety, efficacy and potential limitations of these solutions.

**Scientific novelty.** This article makes a significant contribution to the knowledge of artificial blood by providing a comprehensive overview of its potential and the challenges associated with its clinical application. Key issues such as the efficacy of blood substitutes compared to natural human blood, their bioavailability, stability and potential side effects are highlighted. It also looks at production costs and the acceptance of such products by the medical community and patients. The study also highlights the need for further research and the development of innovative technologies that could improve the availability and safety of artificial blood. Potential future research directions are discussed, including the use of nanotechnology, bioengineering and biomaterials to develop more efficient and safer blood substitutes.

**Conclusions.** The development of artificial red blood cell substitutes could be a breakthrough in emergency medicine and in situations where traditional transfusions are impossible or difficult to perform (e.g., in combat situations, natural disasters, or locations with limited blood supply). Despite years of research and technological advances, many blood substitutes face challenges related to limited stability, potential toxicity and the ability to effectively transport oxygen. Existing products that have undergone clinical trials show promising properties, but are still far from fully replacing natural blood. Research suggests that further work to improve artificial blood should focus on improving safety, extending shelf life and optimising production costs. The outlook in this field is promising, and future advances could revolutionise the treatment of patients requiring blood transfusions and contribute to improved access to healthcare worldwide.

**Key words:** artificial blood, blood substitutes, clinical applications, haemoglobin carriers, oxygen therapeutic agents, perfluorocarbons, hemoglobin-based oxygen carriers

## Wprowadzenie

Współczesna medycyna stoi przed ogromnym wyzwaniem, jakim jest zapewnienie odpowiednich ilości krwi do transfuzji. Niedobór krwi, wynikający z malejącej liczby dawców, starzejącego się społeczeństwa oraz rosnących potrzeb klinicznych, zmusza naukowców do poszukiwania alternatywnych rozwiązań. Jednym z najbardziej obiecujących kierunków badań jest rozwój sztucznej krwi – substancji, która mogłaby zastąpić krew ludzką w procesach ratowania życia i leczenia (Seifried and Mueller, 2011; Gasparovic Babic et al., 2024).

Idea sztucznej krwi nie jest nowa. Już w XX wieku rozpoczęto prace nad substytutami, które mogłyby pełnić funkcję transportu tlenu, ale dopiero niedawne osiągnięcia w dziedzinie bioinżynierii i nanotechnologii otworzyły nowe możliwości w tej dziedzinie. Sztuczna krew ma szansę nie tylko uzupełnić braki krwi w szpitalach, lecz także stać się niezastąpionym

narzędziem w sytuacjach nagłych, takich jak klęski żywiołowe, wojny czy odległe misje kosmiczne (Sarkar, 2008).

Celem niniejszego artykułu jest przegląd aktualnych osiągnięć naukowych oraz analiza perspektyw rozwoju tej przełomowej technologii. W pierwszej części przybliżono skład sztucznej krwi i jej rodzaje, następnie omówiono obecny stan badań oraz wyzwania technologiczne, które wymagają pokonania. W ostatniej części przedstawiono potencjalne korzyści oraz przyszłe kierunki rozwoju, które mogą uczynić sztuczną krew powszechnym rozwiązaniem w medycynie.

**Znaczenie krwi w organizmie i wyzwania związane z jej niedoborem.** Krew pełni fundamentalną rolę w utrzymaniu życia i zdrowia człowieka. Jedną z jej kluczowych funkcji jest transportowanie tlenu z płuc do wszystkich tkanek organizmu. Tlen nie tylko warunkuje życie, ale także zapewnia prawidłowy przebieg procesów fizjologicznych w ludzkim ciele (Rhodes et al., 2024). Utrata krwi



lub niedokrwistość mogą prowadzić do niedotlenienia, co negatywnie wpływa na funkcjonowanie narządów, zwłaszcza mózgu, serca i tkanek. W skrajnych przypadkach skutkuje to trwałymi uszkodzeniami, a nawet zgonem. Dlatego zapewnienie odpowiedniej podaży tlenu do tkanek stanowi niezbędną element podtrzymania funkcji życiowych organizmu (Macciò and Madeddu, 2012).

Każdego dnia na całym świecie wielu pacjentów wymaga transfuzji krwi z różnych przyczyn. Niestety, jednym z istotnych wyzwań systemów opieki zdrowotnej pozostaje ograniczona dostępność krwi i jej składników w momentach, gdy są one najbardziej potrzebne. Mimo wieloletnich badań oraz dynamicznego rozwoju medycyny i technologii, skuteczna metoda wytwarzania sztucznej krwi wciąż nie została opracowana. Współcześnie jedynym jej źródłem pozostaje organizm ludzki (Niechwiadowicz-Czapka i Klimczyk, 2011; Osaro and Charles, 2011).

W ostatnich latach obserwuje się jednak znaczny spadek liczby honorowych dawców krwi. Według zaleceń Światowej Organizacji Zdrowia, aby zapewnić odpowiednie rezerwy krwi w danym kraju, regularne jej oddawanie powinno obejmować 2–2,5 % populacji (Guidelines Review Committee, 2010). Tymczasem w Polsce wskaźnik ten wynosi zaledwie 1,9 %, podczas gdy w Stanach Zjednoczonych sięga aż 7% (Makowicz et al., 2022). Za taki stan rzeczy odpowiada m.in. starzejące się społeczeństwo oraz rozpowszechnione mity dotyczące oddawania krwi, które mogą zniechęcać potencjalnych dawców. Wśród najczęściej powtarzanych błędnych przekonań znajdują się m.in. obawa przed uzależnieniem się od oddawania krwi, lęk przed nadprodukcją krwi przy jej regularnym oddawaniu oraz przekonanie, że może to prowadzić do rozwoju nadciśnienia (Kozłowska and Kempa, 2011).

Współczesna medycyna coraz bardziej potrzebuje krwi i jej składników, zwłaszcza w leczeniu chorób nowotworowych, po operacjach kardiochirurgicznych oraz w transplancjologii. Niemniej jednak, pozyskanie nowych dawców stanowi istotne wyzwanie (Thomson et al., 2009; Gasparovic Babic et al., 2024). Dodatkowo, coraz częściej odnotowywane są przypadki niepożądanych reakcji po transfuzjach krwi, a także pojawiają się nowe czynniki zakaźne przenoszone drogą krwi (Dellinger and Anaya, 2004; Bloch et al., 2012). Wszystkie te czynniki stanowią silne argumenty, które skłaniają naukowców do nieustannych

poszukiwań alternatywnych rozwiązań dla ludzkiej krwi.

**Historia, wyzwania i perspektywy rozwoju substytutów krwi.** W historii medycyny istniała potrzeba opracowania substytutów krwi od czasów, gdy pacjenci umierali z powodu poważnych ran. Pierwsze zapisy dotyczące transfuzji krwi pochodzą od starożytnych Inków. Jednak dopiero w 1616 roku William Harvey opisał krążenie krwi, co stało się podstawą dalszych prób zastąpienia krwi innymi substancjami, takimi jak piwo, mocz, mleko, żywice roślinne czy krew owiec. W XVIII wieku eksperymenty z substytutami krwi, takimi jak mleko czy sól fizjologiczna, miały ograniczoną skuteczność i były porzucane z powodu wątpliwej efektywności lub skutków ubocznych (Sarkar, 2008).

Badania nad alternatywami dla krwi rozpoczęły się około 150 lat temu. W poszukiwaniu substytutu krwi T. Gaillard Thomas zaproponował wstrzykiwanie mleka krowiego dożylnie, co określił jako „iniekcje mleczne” (Thomas, 1878). Swoją hipotezę uzasadniał podobieństwami chemicznymi pomiędzy chłonką a mlekiem, podkreślając, że oba są emulsjami tłuszczowymi zawieszonymi w płynie. Thomas przedstawił trzy studia przypadków pacjentów w stanie agonalnym, którym podał około 8 uncji świeżego mleka krowiego. Jeden z pacjentów przeżył, a dwóch zmarło. Śmierć tych pacjentów przypisał innym komplikacjom, niezwiązanym z iniekcjami mlecznymi, argumentując, że były one bezpieczne pod warunkiem użycia świeżego mleka (Chen et al., 2009).

Pomimo twierdzeń Thomasa, rozwój substytutów krwi skoncentrował się na tworzeniu roztworów hemoglobiny, które po raz pierwszy były testowane klinicznie na początku XX wieku. Charakterystyka hemoglobiny jako nośnika tlenu czyniła ją logicznym wyborem dla substytutów krwi, jednak jej stosowanie wiązało się z nieoczekiwanymi konsekwencjami (Chen et al., 2009). Amberson i współpracownicy (1933) przeprowadzili eksperymenty na kotach, całkowicie zastępując ich krew hemoglobiną wolną od komórek rozpuszczoną w roztworze Ringera z mleczanami. Wykazali, że roztwór ten mógł podtrzymać życie, jednak korzyści były krótkotrwałe, a leczenie powodowało poważne uszkodzenia nerek. Mimo tych obserwacji przeprowadzono badania kliniczne z użyciem hemoglobiny w roztworze Ringera, które niestety doprowadziły do znacznych dysfunkcji nerek u 5 z 14 pacjentów. W rezultacie Amber-

son i współpracownicy zaniechali dalszych badań, dochodząc do wniosku, że roztwory hemoglobiny wymagają dalszego rozwoju z uwagi na ich toksyczność nerkową i indukcję nadciśnienia naczyniowego (Chen et al., 2009).

W 1883 roku odkrycie roztworu Ringer'a, który mógł przywrócić ciśnienie krwi, stanowiło ważny krok w rozwoju sztucznej krwi, choć nie zastępował on działania czerwonych krwinek. Dopiero w XX wieku, dzięki pracy Karla Landsteinerja nad klasyfikacją grup krwi, transfuzje stały się bezpieczniejsze, a system krwiodawstwa został wprowadzony na szeroką skalę (Sarkar, 2008).

W latach 50. XX wieku Marynarka Wojenna Stanów Zjednoczonych leczyła 47 anemicznych i gorączkujących marynarzy, podając im jeden lub więcej wlewów roztworów hemoglobiny. U 17 marynarzy wystąpiło nadciśnienie, a 12 z 52 wlewów wywołało objawy problemów z nerkami. U pozostałych marynarzy, którzy nie mieli problemów z nerkami, wystąpiły inne działania niepożądane. Toksyczność nerkowa była prawdopodobnie spowodowana zatkaniami kanalików nerkowych przez hemoglobinę i błonę stromalną erytrocytów, upośledzeniem funkcji nerek związanym z odkładaniem pigmentu hemowego oraz zmniejszeniem przepływu krwi przez nerki na skutek wazokonstrykcji indukowanej hemoglobiną (Winslow, 1992).

Z powodu dowodów na toksyczność nerkową roztworów hemoglobiny zainteresowanie nimi zmalało i minęło kilka lat, zanim opracowano użyteczne roztwory hemoglobiny wolnej od stromalnych zanieczyszczeń. Techniki ultraczyszczenia, pozwalające na usunięcie stromy i innych pozostałości komórkowych, w dużej mierze rozwiązały problem toksyczności nerek. Jednak pojawiły się nowe wyzwania. Naturalna hemoglobina tetrameryczna, po usunięciu z erytrocytów, rozpada się na dimery, które są szybko usuwane przez filtrację kłębuszkową, co skutkuje krótkim okresem półtrwania w naczyniach. Dodatkowo wolna hemoglobina ma ograniczony kontakt z fosforanami, co powoduje przesunięcie krzywej  $P_{50}$  w lewo, skutkując wysokim powinowactwem do tlenu i ograniczoną zdolnością jego uwalniania (Chen et al., 2009).

Aby pokonać te ograniczenia, zastosowano różne podejścia do stabilizacji molekularnej i chemicznej modyfikacji hemoglobiny. Pod koniec lat 60. badacze z Armii Stanów Zjednoczonych opracowali nowy obiecujący

roztwór hemoglobiny. Bunn i Jandl (1968) zastosowali sieciowanie hemoglobiny za pomocą bis (N-maleimidometylowego) eteru (BME), co wydłużyło jej czas retencji wewnątrz naczyniowej. Sieciowanie zmniejszyło tendencję hemoglobiny do tworzenia dimerów, co ograniczyło jej filtrację nerkową i usuwanie (Bunn and Jandl, 1968).

Inni badacze modyfikowali hemoglobinę chemicznie w miejscach wiązania 2,3-DPG, grupach aminowych czy wewnętrznych strukturach w celu zapobieżenia jej rozpadowi na dimery  $\alpha\beta$  i przywrócenia wartości  $P_{50}$  do poziomu zbliżonego do normalnego (Winslow, 2006a,b). Bosen i współpracownicy (1975) zastosowali inny sposób – polimeryzację hemoglobiny z użyciem glutaraldehydu, co wydłużyło jej czas retencji wewnątrz naczyniowej. Kolejną metodą było przyłączenie hemoglobiny do większych cząsteczek, co pozwalało na jej dłuższe pozostawanie w układzie naczyniowym w porównaniu z hemoglobiną niemodyfikowaną. W jednym z badań wykazano, że hemoglobina połączona z dekstranem podtrzymywała życie psów i kotów w warunkach braku erytrocytów (Tam et al., 1976, 1978).

Badania nad substytutami krwi wznowiono po II wojnie światowej, kiedy to zaczęto stosować osocze ludzkie w transfuzjach. W 1966 roku pojawiła się koncepcja wykorzystania związków perfluorokarbonowych (PFC) jako substytutów krwi. Choć badania nad nimi były obiecujące, to system krwiodawstwa rozwinięty w krajach rozwiniętych zmniejszył zainteresowanie dalszymi badaniami. Wzrost zainteresowania nastąpił po wojnie w Wietnamie, kiedy to odkryto, że transfuzje mogą przekazywać HIV i wirusowe zapalenie wątroby, co spowodowało intensyfikację poszukiwań nowych syntetycznych nośników tlenu (Sarkar, 2008).

**Krew i jej substytuty: kluczowa rola, właściwości i nowoczesne rozwiązania terapeutyczne.** Krew odgrywa fundamentalną rolę w organizmach żywych, zapewniając transport tlenu z płuc do tkanek oraz dwutlenku węgla z tkanek do płuc. Główną funkcję w tym procesie pełnią czerwone krwinki, które naturalnie wiążą tlen i transportują go do komórek. Zdolność ta wynika z obecności hemoglobiny w erytrocytach – tetramerycznego białka zdolnego do odwracalnego wiązania tlenu oraz dwutlenku węgla. Hemoglobina składa się z dwóch łańcuchów polipeptydowych  $\alpha$  (1 i 2) oraz dwóch łańcuchów  $\beta$  (1 i 2), z

których każdy zawiera grupę hemową z atomem żelaza, umożliwiającą wiązanie jednej cząsteczki tlenu (Chen et al., 2009; Khan et al., 2020).

Krew, często uważana za esencję życia, pełni wiele istotnych funkcji fizjologicznych dzięki składnikom osocza i komórkom. Transportuje tlen oraz składniki odżywcze do tkanek, a także usuwa produkty przemiany materii. Białe krwinki (granulocyty oraz limfocyty B i T) pełnią kluczową rolę w odpowiedzi immunologicznej, natomiast płytki krwi, czynniki krzepnięcia i fibrynolizy są niezbędne do utrzymania równowagi pomiędzy tworzeniem a rozkładem skrzepów. Krew transportuje również hormony i odgrywa ważną rolę w utrzymaniu równowagi pH, która musi być precyzyjnie regulowana na poziomie 7,40 (InformedHealth.org, 2006).

Dojrzałe ludzkie erytrocyty charakteryzują się dwuwklęsłym kształtem dysku oraz brakiem organelli, co wyróżnia je na tle innych

komórek ssaków. Pomimo braku pełnego układu energetycznego i genetycznego, erytrocyty żyją około 120 dni i pełnią istotną rolę w transporcie tlenu do tkanek. Ich dwuwklęsły kształt, wynikający z wysokiego stężenia hemoglobiny i braku jądra, zapewnia większą elastyczność oraz powierzchnię wymiany gazowej, co umożliwia efektywniejszy transport tlenu i dwutlenku węgla (Mohandas and Gallagher, 2008; Zhang et al., 2024).

Błona komórkowa erytrocytów odpowiada za ich właściwości mechaniczne, transportowe i antygenowe. Hemoglobina w błonie transportuje gazy oddechowe, a erytrocyty powstają z komórek macierzystych w szpiku kostnym. Śledziona i wątroba pełnią kluczowe role w metabolizmie erytrocytów, filtrując zużyte komórki i recyklingując żelazo (Zhang et al., 2024).

Cechy charakterystyczne krwinek czerwonych zostały przedstawione na ryc. 1.



Ryc. 1. Cechy charakterystyczne krwinek czerwonych  
(Źródło: Mohandas and Gallagher, 2008; Zhang et al., 2024)

Substytuty krwi, mimo swojej nazwy, nie stanowią pełnowartościowego zamiennika krwi. Zostały zaprojektowane wyłącznie w celu wsparcia jednej konkretnej funkcji terapeutycznej, jaką jest transport tlenu do tkanek. Dlatego też bardziej trafne jest określanie ich mianem „terapeutycznych środków tlenowych” (ang. *oxygen therapeutic agents*, OTAs) (Chen et al., 2009; Khan et al., 2020).

Aby substytuty krwi mogły być skuteczne i bezpieczne w zastosowaniach klinicznych, muszą spełniać określone kryteria (ryc. 2).

Obecnie badania nad substytutami krwi koncentrują się na trzech głównych obszarach (ryc. 3):

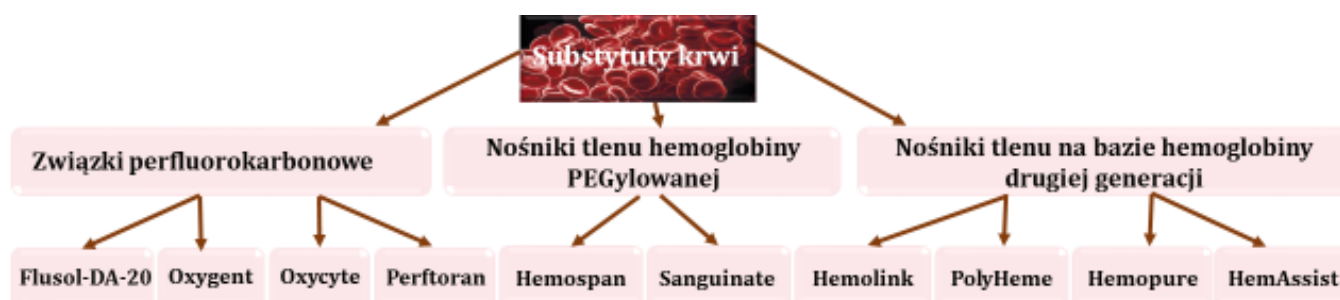
- Syntetyczne nośniki tlenu, takie jak związki perfluorokarbonowe (Haldar et al., 2019; Jägers et al., 2021).

- Nośniki tlenu oparte na hemoglobinie, wytwarzane z hemoglobiny uzyskanej z krwinek czerwonych (Jansman and Hosta-Rigau, 2018; Faggiano et al., 2022).

Sztuczne krwinki czerwone, które mają potencjał, by zastąpić naturalne erytrocyty w procesie transportu tlenu (Azuma and Sakai, 2019; Waeterschoot et al., 2024).



Ryc. 2. Kryteria skuteczności i bezpieczeństwa substytutów krwi w zastosowaniach klinicznych (Źródło: Winslow, 2002; Tappenden, 2007; Jahr et al., 2021; Chen et al., 2023)



Ryc. 3. Główne obszary badań nad substytutami krwi (Źródło: Khan et al., 2020)

**Rodzaje i skład sztucznej krwi.** Sztuczna krew stanowi obiecującą alternatywę dla krwi ludzkiej, która może być wykorzystywana w sytuacjach kryzysowych, takich jak masowe wypadki, operacje medyczne czy niedobory krwi w bankach krwi. Obecnie badania nad sztuczną krwią koncentrują się na różnych podejściach technologicznych i biologicznych, których celem jest odwzorowanie podstawowych funkcji krwi (Sarkar, 2008; Haldar et al., 2019). Poniżej przedstawiono główne rodzaje sztucznej krwi oraz jej skład.

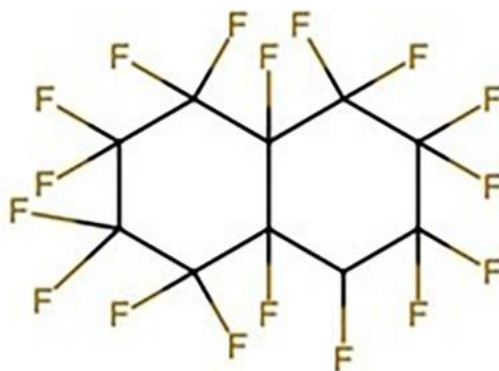
### 1. Syntetyczne nośniki tlenu oparte na perfluorokarbonach (PFCs)

Perfluorowęglowodory (PFC) zostały po raz pierwszy opisane jako nośniki tlenu przez Clarka i Gollana w 1966 roku, którzy wykazali, że myszy mogą przeżyć w roztworze PFC wzbogaconym tlenem (Clark and Gollan,

1966). PFC to syntetyczne cząsteczki zbudowane z atomów węgla i fluoru, które tworzą silne wiązania chroniące przed degradacją chemiczną (ryc. 4).

Dzięki właściwościom hydrofobowym PFC muszą być stabilizowane w emulsjach do użytku dożylnego. W takiej postaci PFC doskonale rozpuszczają gazy, co wynika z niskiej polaryzowalności fluoru i słabych oddziaływań międzycząsteczkowych (Lowe, 1999; Riess, 2005). Wykazują wyjątkowo małe rozmiary – około 100 razy mniejsze niż erythrocyty – oraz zdolność do transportu tlenu i dwutlenku węgla bez ich chemicznego wiązania. Ich najważniejszą właściwością jest zdolność do rozpuszczania gazów, wynosząca 20-25 razy więcej niż w przypadku wody lub osocza, przy czym proces ten zachodzi pasywnie, bez udziału reakcji chemicznych (Lane, 1995; Cohn and Cushing, 2009).





Ryc. 4. Struktura nośnika tlenu na bazie perfluorowęglowodorów  
(Źródło: Khan et al., 2020)

PFC rozpuszczają tlen i dwutlenek węgla efektywnie dzięki zasadzie Henry'ego, która mówi, że stężenie rozpuszczonego gazu jest proporcjonalne do jego ciśnienia cząstkowego. W przeciwieństwie do hemoglobiny, która wymaga wiązań chemicznych do transportu tlenu, PFC umożliwiają szybkie i efektywne uwalnianie gazów w razie potrzeby, niezależnie od temperatury i warunków środowiskowych (Biro and Blais, 1987; Shi et al., 2009).

PFC mają liniową zależność między poziomem rozpuszczonego tlenu a jego ciśnieniem, co oznacza, że do maksymalnej zdolności przenoszenia tlenu konieczne jest wysokie ciśnienie tlenu. Dzięki zastąpieniu atomów wodoru atomami fluoru, PFC są nierozpuszczalne w wodzie i nieulegające metabolizmowi, co wynika z silnych wiązań węgiel-fluor. W zastosowaniach klinicznych wymagają one emulgatorów, aby stały się rozpuszczalne (Riess, 2005).

PFC stanowią atrakcyjną alternatywę dla osób odmawiających transfuzji krwi lub białek pochodzenia ludzkiego czy zwierzęcego. Rozpuszczają tlen w stężeniu 40–50 %, czyli 20 razy więcej niż w wodzie i dwa razy więcej niż w osoczu. Ponadto rozpuszczają 130–160 ml dwutlenku węgla, co przewyższa zdolność wody 2–3 razy (Shi et al., 2009). Niektóre PFC, takie jak FC-80, mają zdolności rozpuszczania tlenu wyższe niż erytrocyty (o 10%).

Podstawowa różnica między transferem tlenu przez hemoglobinę (Hb) a PFC polega na tym, że Hb wiąże tlen chemicznie, podczas gdy PFC go rozpuszczają (Cohn and Cushing, 2009). PFC są odporne na wysokie temperatury (nawet 300°C), co umożliwia ich łatwą sterylizację cieplną (Cabralles and Intaglietta, 2013). Dzięki niewielkim rozmiarom mogą przechodzić przez naczynia zablokowane w niektórych chorobach, gdzie erytrocyty nie mogą się przemieszczać, co

poprawia proces dotlenienia tkanek (Moradi et al., 2016).

Badania *in vitro* wykazały, że PFC jako sztuczna krew są szczególnie użyteczne w przypadku zablokowanych tętnic wieńcowych, pomagając w utrzymaniu funkcji mięśnia sercowego (Mushlin et al., 1985). Dodatkowo badania przeprowadzone przez Chena i innych (2013) pokazały skuteczność PFC w roli substytutu krwi podczas operacji związanych z leczeniem urazowych i krwotocznych wstrząsów, także u ofiar wojennych.

Stabilność molekularna, zdolność do rozpuszczania gazów oraz unikalne właściwości fizykochemiczne czynią PFC obiecującymi kandydatami do zastosowań biomedycznych. Dzięki fluorowanym wiązaniom, PFC wykazują wyjątkowe cechy, które wyróżniają je spośród innych związków organicznych i mogą stanowić podstawę innowacyjnych rozwiązań medycznych (Khan et al., 2020; Kakaiei et al., 2023).

Metabolizm PFC polega głównie na ich wydalaniu przez płuca wraz z powietrzem wydychanym, a częściowo przez fagocyty układu siateczkowo-śródbłonkowego, zwłaszcza w śledzionie i wątrobie. Cząsteczki PFC, zawieszone w osoczu, przemieszczają się pomiędzy krwinkami czerwonymi i w pobliżu ścian naczyń krwionośnych. W płucach wiążą tlen, który następnie uwalniają w tkankach na drodze dyfuzji (Haldar et al., 2019).

PFC są stosunkowo tanie w produkcji, co można osiągnąć bez użycia materiału biologicznego, eliminując tym samym ryzyko przeniesienia chorób zakaźnych przez transfuzję krwi. Niemniej jednak, istnieją dwie główne przeszkody technologiczne ograniczające ich kliniczne zastosowanie. Po pierwsze, są nierozpuszczalne w wodzie, co wymaga stosowania emulgatorów – tłuszczowych związków lipidowych umożliwiających zawieszenie

drobnych cząsteczek PFC we krwi. Po drugie, ich zdolność do przenoszenia tlenu jest mniejsza niż w przypadku produktów opartych na hemoglobinie, co oznacza konieczność ich stosowania w większych ilościach (Sarkar, 2008).

Emulsje perfluorokarbonowe I i II generacji (Moradi et al., 2016; Khan et al., 2020):

1. Fluosol (Green Cross, Japonia);
2. Perftoran (Perftoran, Rosja);
3. Oxygent (Chiny);
4. PHER-O2 (Sanguine Corp.);
5. Oxycyte (Synthetic Blood International).

Zalety i wady emulsji perfluorokarbonowych zostały przedstawione w Tabeli 1.

Tabela 1

### Zalety i wady emulsji perfluorokarbonowych (Jahr et al., 2021)

Zalety emulsji perfluorokarbonowych	Wady emulsji perfluorokarbonowych
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Możliwość masowej produkcji;</li> <li>▪Niski koszt wytwarzania;</li> <li>▪Długi czas przechowywania;</li> <li>▪Minimalna immunogenność;</li> <li>▪Niskie ryzyko zakażeń.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Konieczność stosowania emulgatorów, co może powodować działania niepożądane;</li> <li>▪Wymóg stosowania podwyższonego stężenia tlenu w powietrzu wdychanym;</li> <li>▪Ograniczona zdolność do przenoszenia tlenu przy fizjologicznych wartościach ciśnienia parcjalego tlenu (pO<sub>2</sub>);</li> <li>▪Ryzyko powiększenia śledziony i wątroby, wystąpienia objawów grypopodobnych oraz małopłytkowości;</li> <li>▪Krótki czas działania w krwiobiegu</li> </ul>

Fluosol-DA był pierwszym zaakceptowanym substytutem erytrocytów opartym na PFC. Stanowił emulsję perfluorodekaliny i perfluorotripropylaminy. Zdolność przenoszenia tlenu przez Fluosol-DA wynosi jedynie 7,2 % w temperaturze 37°C, co jest wartością znacznie niższą niż w przypadku erytrocytów (Nishimura et al., 1981). Użycie tego preparatu wiązało się z występowaniem komplikacji, takich jak reakcje płucne, przypuszczalnie spowodowane aktywacją układu dopełniacza przez emulgator zawarty w Fluosol-DA (Bowma, 1983). Reakcje te można było ograniczyć poprzez podanie sterydów. Z tego powodu skuteczność Fluosol-DA nie została potwierdzona w badaniach klinicznych, a jego stosowanie kliniczne zostało przerwane (Lane, 1995).

Wśród PFC szczegółowo badano perflubron oraz perfluorodekalinę (Nishimura et al., 1981). Do substytutów krwi drugiej generacji opartych na PFC należą OxyFluor™ (Hemagen, Inc.) oraz Oxygent™ (alias perflubron, Alliance Pharmaceutical, Inc.) (Lowe, 2006). Obydwa produkty zostały odrzucone w badaniach klinicznych z powodu skutków ubocznych, takich jak trudności w ustaleniu skutecznej dawki OxyFluor™ oraz zwiększone ryzyko udaru mózgu po podaniu Oxygent™ (Tao and Ghoroghchian, 2014). Mimo to nie odnotowano istotnych interakcji między składnikami krwi a

podanymi preparatami PFC, z wyjątkiem pewnych zmian czynników krzepnięcia (Sharma et al., 2011). Podawanie produktów opartych na PFC może prowadzić do łagodnej trombocytopenii (spadek liczby płytek krwi o 10–15 %) oraz wystąpienia objawów podobnych do zespołu grypopodobnego (Kresie, 2001).

Z powodu niekorzystnych wyników w początkowych badaniach klinicznych nad produktami opartymi na PFC, obecnie nie prowadzi się dalszych badań klinicznych w tej dziedzinie. Niektóre produkty, takie jak Perftoran® (Rosyjska Akademia Nauk, Puszczino, Rosja), są stosowane w Meksyku i Rosji. Perftoran, znany w Stanach Zjednoczonych pod nazwą Vidophor™ (FluorO2 Therapeutics, Inc., Boca Raton, FL), obecnie oczekuje na rozpoczęcie badań klinicznych (Latson, 2019). Ostatecznie, z powodu braku wystarczających dowodów klinicznych oraz długotrwałego procesu uzyskiwania zatwierdzenia przez FDA, PFC prawdopodobnie nie staną się praktycznym substytutem krwi w najbliższej przyszłości (Khan et al., 2020).

### 2. Nośniki tlenu oparte na hemoglobinie (*Hb-based oxygen carriers, HBOCs*)

Obecnie prowadzone są intensywne badania nad znalezieniem syntetycznej substancji,



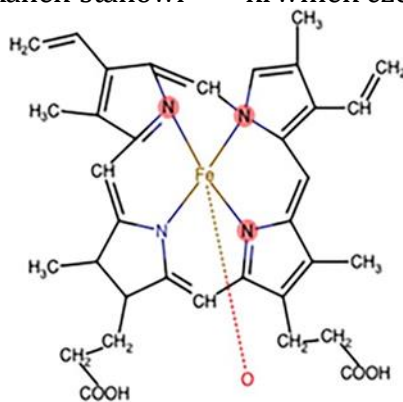
która mogłaby sprostać wyzwaniom związanym z transportem tlenu za pomocą hemoglobiny, efektywnie dostarczając  $O_2$  do tkanek bez wywoływania toksyczności. Niestety, z powodu występowania niekorzystnych zdarzeń w badaniach faz II i III, żaden z dotychczas opracowanych produktów nie uzyskał zatwierdzenia do stosowania klinicznego. Jednak hemoglobinowe nośniki tlenu (HBOC) zostały dopuszczone do użytku klinicznego w Rosji i Republice Południowej Afryki (Lang et al., 1990; Stowell, 2008).

Mimo tych trudności, badania te dostarczyły nowych informacji na temat podstawowych cech biofizycznych hemoglobiny oraz systemów transportu tlenu, otwierając drogę do opracowania produktów o wysokiej zdolności przenoszenia tlenu i minimalnym ryzyku interakcji z hemodynamiką. W tym kontekście produkty oparte na hemoglobinie rozwijane są jako uzupełnienia lub farmaceutyczne środki pomostowe dla transfuzji allogenicznych krwinek czerwonych (Chang, 2003).

Hemoglobina w postaci wolnej może być teoretycznie stosowana jako substytut krwi, ponieważ zachowuje zdolność transportu tlenu poza krwinkami czerwonymi. Jednak jej toksyczność wobec otaczających tkanek stanowi

poważne ograniczenie. Toksyczność obejmuje wychwytywanie tlenku azotu (NO) przez śródbłonek, co prowadzi do wazokonstrykcji (zweżenia naczyń krwionośnych) oraz powstawania reaktywnych rodników tlenowych, hemem i globiną. Ponadto, w przypadku braku 2,3-difosfoglicerynianu (2,3-DPG), wolna hemoglobina jest bardzo nieefektywnym transporterem tlenu, uwalniając jedynie niewielkie ilości  $O_2$  do tkanek (Simoni et al., 2009). Pierwsze zastosowanie hemoglobiny bezkomórkowej u człowieka zostało odnotowane w 1949 roku przez dr. Ambersona i jego zespół, którzy zastosowali roztwór hemoglobiny u pacjentki z masywnym krwotokiem poporodowym (Amberson et al., 1949).

Ze względu na toksyczny charakter wolnej hemoglobiny oraz konieczność obecności 2,3-DPG dla efektywnego transportu tlenu, opracowanie HBOC jest dużym wyzwaniem (ryc. 5). Niemniej jednak, udane stworzenie substytutu krwi opartego na HBOC oferuje wiele korzyści, takich jak brak konieczności testów zgodności przed podaniem, możliwość sterylizacji przez ultrafiltrację lub pasteryzację oraz długi okres przydatności do użycia – cechy, które nie dotyczą tradycyjnych preparatów z krwinek czerwonych od dawców.



Ryc. 5. Struktura nośnika tlenu na bazie hemoglobiny  
(Źródło: Khan et al., 2020)

To jedna z najbardziej zaawansowanych technologii w obszarze sztucznej krwi. HBOC to substytuty krwi bazujące na naturalnej hemoglobinie, które uzyskuje się w procesach polimeryzacji, sieciowania oraz modyfikacji z wykorzystaniem polimerów. Dzięki właściwościom zbliżonym do naturalnej hemoglobiny w zakresie transportu i uwalniania tlenu stanowią one główny przedmiot badań wśród sztucznych nośników tlenu (Zhu et al., 2024).

Źródłem hemoglobiny są przeterminowana, oczyszczona krew ludzka lub bydłęca oraz metody inżynierii genetycznej (Jahr et al.,

2021). Tlen wiąże się z tymi związkami w sposób identyczny jak z naturalnie występującą hemoglobiną. Ze względu na szybki rozpad, możliwość uszkodzenia nerek oraz wysokie powinowactwo do tlenu, utrudniające jego uwalnianie do tkanek, hemoglobina jest modyfikowana. Modyfikacja obejmuje dodatkowe wiązania wewnątrz cząsteczki hemoglobiny, pomiędzy cząsteczkami hemoglobiny lub z substancjami wielkocząsteczkowymi (Sarkar, 2008).

Do stabilizacji hemoglobiny stosuje się różne strategie:

**a) Polimeryzacja hemoglobiny.** Proces ten umożliwia znaczne zwiększenie rozmiaru hemoglobiny pozbawionej komórek, ogranicza wynaczynienie oraz wydłuża czas jej obecności w krążeniu. Polimeryzacja zwykle przeprowadzana jest z użyciem aldehydu glutarowego. Do przykładów produktów opartych na spolimeryzowanej hemoglobinie należą HemAssist, Hemolink, PolyHeme oraz Hemopure (weterynaryjna wersja: Oxyglobin) (Chen et al., 2023).

**b) Sieciowanie hemoglobiny.** Hemoglobinę można usieciować pomiędzy łańcuchami  $\alpha$  lub  $\beta$ , stosując diaspiryne lub rafinozę jako łączniki. Usieciowane tetrametry stabilizują cząsteczkę i zapobiegają dysocjacji oksyhemoglobiny na dimery, które łatwo są wydalane przez nerki. Hemoglobiny, które są usieciowane wewnątrz cząsteczki, mimo że nie wykazują istotnego wzrostu masy cząsteczkowej, charakteryzują się większą trwałością i rozpuszczalnością w roztworach. Teoretycznie produkty te powinny mieć lepszą zdolność transportu tlenu niż naturalne krwinki czerwone (Sarkar, 2008; Chen et al., 2023).

**c) Koniugacja z enzymami przeciwutleniającymi.** Sprzężenie hemoglobiny z enzymami przeciwutleniającymi może chronić cząsteczkę przed uszkodzeniami wywołanymi

przez wolne rodniki. Dodatkowo, koniugacja zwiększa rozmiar cząsteczek, co zmniejsza ich usuwanie przez nerki oraz redukuje ich przechodzenie przez ściany naczyń, ograniczając wychwytywanie tlenu azotu.

Kombinacja powyższych technik, takich jak polimeryzacja z usieciowaniem lub koniugacją, może prowadzić do uzyskania hemoglobiny o lepszych właściwościach funkcjonalnych i biologicznych (Chen et al., 2023). Spośród różnych modyfikacji Hb, jedynie polimerowa hemoglobina (PolyHb) oparta na nanotechnologii oraz hemoglobina sprzężona wykazują skuteczność (Chang, 2006). Niemniej jednak, z powodu krótkiego okresu półtrwania we krwi i działań niepożądanych, większość tych produktów nie spełniła wymagań klinicznych (Tao and Ghoroghchian, 2014). Głównym problemem, który ogranicza zastosowanie tych produktów, jest ich brak zdolności do konwersji  $Fe^{3+}$  do  $Fe^{2+}$ , co jest istotną funkcją krwinek czerwonych. W efekcie tworzy się Met-Hb, który ma ograniczoną zdolność przenoszenia tlenu. Jednakże, wykazano, że takie komplikacje mogą być unikane poprzez przyłączenie odpowiednich reduktorów do powierzchni hemoglobiny w tych produktach (Tao and Ghoroghchian, 2014).

Tabela 2

Zalety i wady roztworów hemoglobiny (Jahr et al., 2021)

Zalety roztworów hemoglobiny	Wady roztworów hemoglobiny
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Duża zdolność wiązania tlenu i dwutlenku węgla;</li> <li>▪Możliwość stosowania przy fizjologicznych wartościach <math>pO_2</math>;</li> <li>▪Brak antygenów czerwonych;</li> <li>▪Przedłużony czas przechowywania;</li> <li>▪Możliwość sterylizacji i inaktywacji wirusów</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Szybka eliminacja z krwioobiegu;</li> <li>▪Potencjalna toksyczność dla nerek;</li> <li>▪Oddziaływanie hipertensyjne na naczynia krwionośne;</li> <li>▪Możliwość nasilenia działania endotoksyn bakteryjnych</li> </ul>

**Ewolucja substytutów krwi: od pierwszej do trzeciej generacji.** Pierwsza generacja substytutów krwi opierała się na produktach zawierających hemoglobinę pozbawioną błon komórkowych (ang. *stroma-free hemoglobin*, SFH). Produkty te uzyskiwano poprzez lizę zagęszczonych erytrocytów, w wyniku czego powstawała rozpuszczalna hemoglobina. Następnie mieszaninę tę wirowano w celu usunięcia większości składników błony erytrocytarnej, co prowadziło do otrzymania SFH. Procedura ta pozwalała uzyskać 500 ml roztworu hemoglobiny o

stężeniu 7 g/100 ml i fizjologicznym poziomie sodu, potasu oraz wodorowęglanów. Roztwór charakteryzował się pH na poziomie 7,1–7,2 oraz osmolalnością wynoszącą 270–280 mOsm/kg. Stężenie methemoglobiny stanowiło 7–12 % całkowitej zawartości hemoglobiny i nie zmieniało się znacząco w ciągu czterotygodniowego okresu przechowywania w temperaturze 4°C. Produkcja SFH mogła być realizowana za pomocą ultrafiltracji lub krystalizacji (Browdie and Smith, 1975).

SFH uzyskane metodą ultrafiltracji zawierały znacznie mniejsze ilości resztko-

wych fosfolipidów błonowych i bardziej jednorodny skład białkowy. Ponadto, te preparaty były praktycznie pozbawione działania wazokonstrykcyjnego oraz właściwości obniżających kurczliwość mięśnia sercowego w modelach perfuzji *ex vivo*. W przeciwieństwie do tego, SFH uzyskane metodą krystalizacji charakteryzowały się niższym stopniem oczyszczenia z fosfolipidów i białek, co sprzyjało powstawaniu agregatów białkowych w trakcie przechowywania i wywoływało działania niepożądane, takie jak wazokonstrykcja i zmniejszenie kurczliwości, które mogły znacząco różnić się między seriami produkcyjnymi. Badania wskazały, że metoda ultrafiltracji i separacji wielkościowej prowadziła do uzyskania SFH o wyższej jakości w porównaniu do metody krystalizacji (Lang et al., 1990).

Druga generacja HBOC obejmowała koniugaty hemoglobiny pirydoksyloowanej i polioksyetylenu (PHPC). Produkty te powstawały w wyniku chemicznej modyfikacji SFH i zostały zaprojektowane, aby wyeliminować główne wady pierwszej generacji, takie jak zwiększone powinowactwo hemoglobiny do tlenu, krótki czas krążenia w organizmie oraz nefrotoksyczność (Riess, 2006). W procesie produkcji SFH poddawano pirydoksytacji (dodatek witaminy B<sub>6</sub>) w celu regulacji powinowactwa do tlenu, a następnie wiązano z  $\alpha$ -karboksymetyl- $\omega$ -karboksymetoksy polietylenem, co zwiększało masę cząsteczkową i wydłużało czas przebywania we krwi (Chang, 1992).

Do produktów drugiej generacji należały m.in. PolyHeme<sup>®</sup> (Northfield Laboratories), Hemopure<sup>®</sup> (HBOC-201, Hemoglobin Oxygen Therapeutics) oraz HemoLink<sup>™</sup> (Hemosol Inc.). Chociaż wiele z tych produktów wycofano z powodu działań niepożądanych zaobserwowanych w badaniach klinicznych, Hemopure<sup>®</sup> uzyskał zgodę południowoafrykańskiej rady leków na leczenie anemii już w 2001 roku. Produkt ten jest również dostępny w Stanach Zjednoczonych w ramach programu rozszerzonego dostępu FDA (compassionate use) dla pacjentów z zagrażającą życiu anemią, którzy nie akceptują transfuzji krwi (np. Świadkowie Jehowy) (Jahr et al., 2007; Mer et al., 2016).

Trzecia generacja substytutów krwi obejmowała hemoglobinę usieciowaną między łańcuchami  $\alpha$  przy użyciu bis(dibromosalicyl) fumaranów (DBBF) lub  $\alpha\alpha$ -hemoglobinę. Produkty te zostały opracowane w *Letterman*

*Army Institute of Research* (LAIR) w San Francisco oraz przez *Baxter International Corporation*, która stworzyła preparat HemAssist<sup>®</sup> oparty na hemoglobinie usieciowanej aspiryną (*diaspirin-crosslinked hemoglobin*, DCLHB) (Winslow, 1995; Highsmith et al., 1997; Jahr et al., 2007; Vincent et al., 2015). Produkty trzeciej generacji powstawały z przeterminowanej krwi ludzkiej lub wołowej. Krwinki czerwone pługano w sterylnym roztworze soli fizjologicznej, aby usunąć resztki osocza, a następnie poddawano je hiperonicznej lizie. Pozostałości błon komórkowych filtrowano, uzyskując oczyszczoną hemoglobinę, którą poddawano procesowi usieciowania, co pozwalało osiągnąć wydajność na poziomie 55–58% (Nelson et al., 1992; Jahr et al., 2007). Ostateczne produkty wykazywały zdolność do przenoszenia tlenu z właściwościami zbliżonymi do krwi ludzkiej, jednakże w badaniach klinicznych III fazy odnotowano zwiększoną śmiertelność, co ograniczyło ich zastosowanie (Jahr et al., 2007).

Mimo tych ograniczeń, HemoLink<sup>™</sup> wyróżnia się jako nowoczesny produkt oparty na hemoglobinie usieciowanej z aktywowanym cukrem (O-rafinoza). Wykazuje on specyficzne właściwości fizykochemiczne, takie jak ciśnienie P50 na poziomie 30–40 mmHg i brak kooperacyjności w wiązaniu tlenu (współczynnik Hill'a  $n = 1$ ). Produkt ten był testowany w badaniach klinicznych I i II fazy wśród pacjentów poddawanych planowym zabiegom pomostowania tętnic wieńcowych (CABG), jednak brak dostępnych danych z badań III fazy ogranicza jego dalsze zastosowanie (Carmichael et al., 2000; Hill et al., 2002; Boykins et al., 2005).

Nośniki tlenu na bazie Hb (HBOC) dzielą się na dwie grupy: HBOC bezkomórkowe i HBOC komórkowe (ryc. 6 i 7). Opracowano bezkomórkowe HBOC w celu zwiększenia wydajności Hb i zmniejszenia jej skutków ubocznych (Moradi et al., 2016). Obecnie znajdują się one w różnych fazach badań klinicznych i należą do trzech kategorii, w tym usieciowanego HBOC, polimeryzowanego HBOC i sprzężonego HBOC (ryc. 6). Jednak spośród różnych modyfikacji Hb skuteczne są jedynie polihemoglobina (PolyHb) oparta na nanotechnologii i sprzężona Hb (Chang, 2006). Jednak ze względu na krótki okres półtrwania we krwi i skutki uboczne większość tych produktów nie osiągnęła wymaganych kryteriów w badaniach klinicznych (Tao and Ghoroghchian, 2014).



Ryc. 6. Bezkomórkowe nośniki tlenu na bazie hemoglobiny (Moradi et al., 2016)

Inne rodzaje produktów opartych na hemoglobinie, stosowanych jako sztuczna krew, to komórkowe nośniki tlenu, w których hemoglobina jest zamknięta w strukturze przypominającej komórkę. W ten sposób powstały produkty o najwyższej podobieństwie

do krwinek czerwonych, które nie powodują aktywacji naczyniowej z powodu wychwytywania tlenu azotu (NO). Podsumowanie produktów odpowiadających komórkowym produktom opartym na hemoglobinie przedstawiono na ryc. 7.



Ryc. 7. Komórkowe nośniki tlenu na bazie hemoglobiny (Moradi et al., 2016)

**Hb rekombinowana.** Najwyższą aktywność hemoglobina wykazuje, gdy znajduje się w erytrocytach. Dlatego też, jeśli Hb ma być stosowana w formie wolnej od komórek, konieczne jest jej poddanie licznym modyfikacjom w celu zwiększenia czasu półtrwania w krążeniu oraz zapobiegania związanym z tym powikłaniom w organizmie.

Rekombinowana produkcja hemoglobiny ułatwia wprowadzanie modyfikacji, szczególnie za pomocą mutagenyzy ukierunkowanej na określone miejsca (Fronticelli and Koehler, 2009).

W latach 80. XX wieku rozpoczęto masową produkcję ludzkiej hemoglobiny w organizmach transgenicznym. Od tego czasu

prowadzone są badania mające na celu poprawę jakości oraz efektywności produkcji rekombinowanej hemoglobiny. Należy podkreślić, że większość badań koncentruje się na wytwarzaniu hemoglobiny za pomocą systemu ekspresji w *E. coli* (Hoffman et al., 1990; Varnado et al., 2013). Jednak hemoglobinę wyrażano również w innych systemach bakteryjnych, a także w transgenicznym myszach i świniami (Varnado et al., 2013). Niemniej jednak najważniejszymi problemami w rekombinowanej produkcji hemoglobiny są niskie wydajności ekspresji, wysokie koszty procesów produkcyjnych oraz trudności w uzyskaniu oczekiwanej czystości produktu (Varnado et al., 2013).

Podjęto wiele prób zwiększenia wydajności produkcji rekombinowanej hemoglobiny. Na przykład, w jednym z badań zastosowano system ekspresji w *E. coli* do produkcji dużych ilości ludzkiej  $\alpha$ -globiny oraz bydlęcej  $\beta$ -globiny do celów terapeutycznych (Hoffman et al., 1990). Następnie powstałe hemoglobiny (Hb Minotaur) polimeryzowano za pomocą międzycząsteczkowych wiązań dwusiarczkowych, tworząc Hb Polytaur. Badania na zwierzętach wykazały pewne przewagi tego produktu nad innymi tego rodzaju (Bobofchak et al., 2003).

Zaproponowano także, że mutacje łańcuchów hemoglobiny ( $\beta$ Gly16  $\rightarrow$  Ala i  $\alpha$ Gly15  $\rightarrow$  Ala) mogą zwiększyć wydajność jej produkcji poprzez zapobieganie degradacji i agregacji wyrażanych łańcuchów. Ponadto, w celu zwiększenia wydajności produkcji hemu niezbędnego do wytwarzania funkcjonalnej hemoglobiny, można zastosować strategię jednoczesnej ekspresji transportera hemu w błonie bakteryjnej. Taka metoda może zwiększyć wychwyt hemu przez gospodarza bakteryjnego, a tym samym poprawić wydajność produkcji hemoglobiny (Graves et al., 2008).

Ukierunkowane mutacje hemoglobiny mogą także prowadzić do poprawy jej funkcji poza erytrocytami. Przykładowo, mogą one zwiększyć powinowactwo do tlenu, zmniejszyć zdolność hemoglobiny do wiązania NO, ograniczyć autoutlenianie, zmniejszyć tempo utraty hemu, zapobiec dysocjacji podjednostek oraz ograniczyć nieodwracalną denaturację podjednostek (Varnado et al., 2013).

W innym badaniu wyprodukowano rHb ( $\beta$ N108Q) przy użyciu systemu ekspresji w *E. coli*. W tej wersji hemoglobiny mutacja N  $\rightarrow$  Q wystąpiła w pozycji 108 łańcucha  $\beta$ , która

znajduje się w interfejsie podjednostek  $\alpha\beta$ 1 oraz w centralnej jamie hemoglobiny. Mutacja ta powoduje zmniejszenie powinowactwa do tlenu, zwiększenie kooperatywności oraz obniżenie autoutleniania produktu (Hoffman et al., 1990; Tsai et al., 2000).

Są to jedynie niektóre przykłady udanych prób produkcji rekombinowanych HBOC, które mogą być wykorzystywane jako potencjalne substytuty krwi. Żaden z tych produktów nie uzyskał jednak licencji terapeutycznej (Varnado et al., 2013).

Przykłady preparatów zawierających zmodyfikowaną hemoglobinę (Moradi et al., 2016; Khan et al., 2020):

- PHP (Apex Bioscience) – ludzka;
- HemAssist (Baxter) – ludzka;
- Hemopure (Biopure) – zwierzęca (bydlęca);
- PEG-hemoglobin (Enzon) – zwierzęca (bydlęca);
- Hemolink (Hemosol) – ludzka;
- PolyHeme (OPK Biotech) – ludzka;
- Optro-rHb-1 (Baxter) – rekombinowana;
- No red cells (Terumo) – ludzka;
- Hemospan (Sangart) – ludzka.

### 3. Sztuczne krwinki czerwone

Nośniki tlenu oparte na hemoglobinie stanowią obecnie obiekt intensywnych badań, ze względu na swoje unikalne właściwości, które są zbliżone do funkcji naturalnych krwinek czerwonych. Hemoglobina pochodząca od ludzi lub zwierząt może zostać zamknięta w dwuwarstwowych kapsułkach fosfolipidowych, które naśladują błonę komórkową erytrocytów. Dodanie cząsteczek cholesterolu do struktury fosfolipidowej zapewnia większą sztywność i stabilność mechaniczną hemoglobiny umieszczonej w liposomach (Moradi et al., 2016).

Proces ten polega na zamknięciu cząsteczek hemoglobiny w liposomach, co określa się także mianem pęcherzyków hemoglobiny (HbV). Mikrokapsułki lipidowe lub wykonane z biodegradowalnych polimerów, które można uzyskać dzięki organicznej koniugacji nanomateriałów z hemoglobiną, odzwierciedlają strukturę naturalnych erytrocytów, jednocześnie przynosząc dodatkowe korzyści, takie jak redukcja aktywności naczyń oraz poprawa bezpieczeństwa biologicznego (Sakai et al., 2009).



Enkapsulacja hemoglobiny w warstwie fosfolipidowej (liposomowo-enkapsulowana hemoglobina (LEH)) wydłużyła czas półtrwania i okres przechowywania w porównaniu do produktów bezkomórkowych. Cząsteczki LEH są znacznie mniejsze od erytrocytów (1:30), co umożliwia im przenikanie do obszarów ciała, do których erytrocyty nie mają dostępu. W związku z tym mogą one przechodzić przez skrzepy i blokady, co prowadzi do poprawy oksygenacji w przypadku udaru (Sharma et al., 2011). Jednakże produkt ten charakteryzuje się krótkim czasem półtrwania w krążeniu, co można poprawić, na przykład, poprzez PEGylację powierzchni cząsteczek (Sharma et al., 2011).

W jednym z badań opracowano liposomowo-enkapsulowane hemoglobiny, określane mianem „neo-erytrocytów,” których skuteczność jako sztucznych erytrocytów została potwierdzona w badaniach nad całkowitym krążeniem pozaustrojowym u zwierząt. Wyniki wskazały, że te produkty mogą dostarczać nawet więcej tlenu niż naturalne erytrocyty (Usuba et al., 1995).

Modyfikacja powierzchni tych liposomów, w tym PEGylacja, prowadzi do produktów o wydłużonym czasie półtrwania, większej stabilności i rozpuszczalności, a także o zmniejszonej antygenowości i immunogenności. „Hb vesicle” to PEGyłowany produkt charakteryzujący się długim czasem półtrwania w surowicy oraz zmniejszoną rozpoznawalnością przez układ odpornościowy (Sakai et al., 2001; Sou et al., 2005).

Krótkotrwałość LEH w surowicy wynika nie tylko z ich eliminacji przez układ siateczkowo-śródbłonkowy, ale również z niszczenia liposomów spowodowanego siłami ścinania w krwiobiegu. Aby rozwiązać ten problem, do wodnego rdzenia submikronowych liposomów wprowadzono matrycę aktywną, co zwiększyło ich wytrzymałość mechaniczną. Ta strategia przyczyniła się do wydłużenia czasu półtrwania produktu, znanego jako LEAcHb (Li et al., 2005).

Kolejną grupą produktów, które pełnią funkcję imitatorów erytrocytów, są biodegradowalne polimerowe nanocząstki załadowane hemoglobina (HbPNP). Największym problemem związanym z ich zastosowaniem jest szybkie usuwanie przez fagocyty, bezpośrednio lub za pośrednictwem opsonin. W celu rozwiązania tego problemu przeprowadzono szereg badań, w tym eksperyment, który wykazał, że zmiana ładunku powierzchniowego

poprzez kationizowany bromek cetylotrimetyloamoniowy zwiększa czas półtrwania PEGyłowanych HbPNP. Zauważono, że ładunek powierzchniowy ma istotny wpływ na czas krążenia tych produktów – anionizowane HbPNP są szybko usuwane z krwiobiegu, podczas gdy kationizowane HbPNP mają długi czas półtrwania (Xu et al., 2009).

Innym rozwiązaniem, które oferuje biokompatybilność, są dendrymery – produkty o rozgałęzionej strukturze molekularnej. Wśród syntetycznych dendrymerów znajdują się polipropylen, poli(aminokwas amonowy) oraz poliester (Scott et al., 2005). W niektórych badaniach przygotowano dendrymery z porfiryną i Fe(II), które miały naśladować funkcję hemoglobiny. Kształt i rozmiar tych produktów przypominają hemoglobinę, a ich zdolność do wiązania i uwalniania tlenu została udowodniona. Produkcja dendrymerów jest jednak czasochłonna i kosztowna. Z tego powodu opracowano nowy typ dendrymerów, tzw. hiperrozgałęzione polimery, które po odpowiednich modyfikacjach mogą być stosowane jako nośniki tlenu, przy jednoczesnym zmniejszeniu trudności związanych z produkcją (Twyman and Ge, 2006; Twyman et al., 2012). Dendrymery są także wykorzystywane w enkapsulacji leków, co sugeruje ich potencjalne zastosowanie jako sztuczne nośniki tlenu przez enkapsulację hemoglobiny (Astruc et al., 2010).

Jako substytut erytrocytów oparty na hemoglobinie badano również nanokapsułki z membraną zbudowaną z ultracienkiego polietylenu glikolu–kwasu polimlekowego (PEG–PLA), zawierające spolimeryzowaną hemoglobinę oraz wszystkie enzymy erytrocytów (Chang et al., 2003). W porównaniu do wcześniejszego produktu, w którym zastosowano jedynie membrany PLA, ta metoda wykazała znaczący wzrost czasu półtrwania produktu dzięki redukcji fagocytozy, co potwierdzono w badaniach na myszach (Chang et al., 2003; Sheng et al., 2009). Wysoki czas krążenia oraz obecność systemów enzymatycznych, w tym reduktazy, stanowią najważniejsze zalety tego systemu. Obecność układu enzymatycznego, zwłaszcza reduktazy, zapobiega akumulacji methemoglobiny (Chang et al., 2003).

Nowa klasa materiałów do enkapsulacji hemoglobiny obejmuje lipogele oraz NHP (nanocząstki hydrożelowe). W przypadku NHP stosuje się niebiodegradowalne, ale biokompa-



tybilne polimery hydrofilowe, które zamykają hemoglobinę w solidnych, sferycznych nanocząstkach hydrożelowych. Liczne komplikacje związane z uwalnianiem hemoglobiny po degradacji biodegradowalnych polimerów przyczyniły się do wzrostu zainteresowania zastosowaniem polimerów niebiodegradowalnych. Lipogeje to NHP zamknięte w dwuwarstwie lipidowej, stanowiące połączenie hydrożelu i liposomu. Tworzone są poprzez fotopolimeryzację monomerów poli(N-izopropylakryloamidu) i poliakryloamidu. Podejście to wzmacnia wytrzymałość mechaniczną systemu liposomalnego. W rzeczywistości produkt ten łączy zalety hydrożelu i liposomu, charakteryzując się wysoką zdolnością załadowania hemoglobiny i niską podatnością na rozpoznawanie przez układ siateczkowo-śródbłonkowy (Patton and Palmer, 2005).

Zwiększoną zdolność załadowania hemoglobiny, nawet wyższą niż w przypadku lipogeli i NHP, wykazano w polimerosomach enkapsulujących hemoglobinę (PEH). Produkt ten składa się z biodegradowalnych, biokompatybilnych kopolimerów amfifilowych diblokowych i jest wykorzystywany do zamykania hemoglobiny ludzkiej lub zwierzęcej. PEH można łatwo produkować w dużych ilościach, a ich powinowactwo do tlenu jest porównywalne do erytrocytów ludzkich. Wytrzymałość mechaniczna oraz możliwość zmiany rozmiaru i grubości są wyższe w przypadku PEH niż w liposomach, a produkty te są w stanie wytrzymać temperatury do 60°C. Są stabilne w roztworze soli fizjologicznej przez kilka miesięcy oraz w krwi przez co najmniej pięć dni. Zgodnie z narastającymi dowodami, produkty te mogą zapowiadać pojawienie się idealnego sztucznego nośnika tlenu (Arifin and Palmer, 2005; Rameez et al., 2008). W przypadku nanokapsułek pojedynczego białka cząsteczka białka jest zamykana w cienkiej warstwie polimerowej, a wynikowy produkt wykazuje odporność mechaniczną, termiczną oraz zmiany pH. Metoda ta została zastosowana również do hemoglobiny (Hegedüs et al., 2014).

Jeszcze jeden nośnik tlenu został opracowany przez grupę badawczą, w którym hemoglobina została sprzężona z biodegradowalnymi polimerowymi micelami (Shi et al., 2009). Micela jest tryblokowym kopolimerem

PEG-PMPC-PLA, w którym PEG pełni rolę zewnętrznej otoczki, PMPC (PLA-b-poli(2-metakryloilooksyetylofosforylocholina)) zawiera grupy propargilowe jako warstwę środkową, a PLA jest warstwą rdzeniową. Po wyprodukowaniu tych miceli w roztworze wodnym grupy Hb wiążą się z micelami za pośrednictwem grup propargilowych, co sprawia, że Hb jest otoczona i chroniona przez łańcuchy PEG (Shi et al., 2009).

Dynamiczny rozwój nanotechnologii i nanomateriałów stworzył nowe możliwości w badaniach nad nośnikami tlenu na bazie hemoglobiny. Nano-HBOC, czyli nośniki hemoglobiny opracowane z wykorzystaniem nanotechnologii, cechują się ulepszoną stabilnością strukturalną, zmniejszoną wazoaktywnością, wydłużonym okresem półtrwania oraz poprawioną biokompatybilnością. Jednakże, mimo intensywnego postępu, Nano-HBOC napotyka na istotne ograniczenia: wymagają skomplikowanych procesów produkcyjnych oraz wysokich nakładów finansowych. Dlatego opracowanie prostszych, bezpieczniejszych i bardziej opłacalnych metod wytwarzania Nano-HBOC pozostaje jednym z głównych kierunków badań (Zhu et al., 2024).

Odtworzenie funkcji i właściwości naturalnych krwinek czerwonych w konstrukcji Nano-HBOC stanowi ogromne wyzwanie technologiczne. Obecnie większość tych rozwiązań znajduje się na etapie badań laboratoryjnych, nie osiągając jeszcze fazy badań klinicznych. Kompleksowa ocena potencjału Nano-HBOC jako substytutów erytrocytów jest zatem niezbędna. Rozwój tego rodzaju technologii może mieć ogromne znaczenie dla postępu w medycynie, oferując rewolucyjne podejście do leczenia pacjentów wymagających transfuzji krwi, a tym samym istotnie poprawiając jakość życia (Zhu et al., 2024).

Wprowadzenie nanocząstek zawierających hemoglobinę przyczyniło się do eliminacji wielu negatywnych skutków ubocznych, takich jak toksyczność związana z obecnością wolnej hemoglobiny, a także zwiększyło zdolność przenoszenia tlenu i efektywność działania dzięki możliwości umieszczenia większej ilości hemoglobiny w kapsułkach (Jahr et al., 2021).

Zalety i wady sztucznych krwinek czerwonych zostały przedstawione w Tabeli 3.

## Zalety i wady sztucznych krwinek czerwonych (Jahr et al., 2021)

Zalety sztucznych krwinek czerwonych	Wady sztucznych krwinek czerwonych
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Dłuższy czas pozostawania w krążeniu w porównaniu do preparatów perfluorokarbonowych i niektórych roztworów hemoglobiny;</li> <li>▪Brak toksyczności związanej z obecnością wolnej hemoglobiny w osoczu;</li> <li>▪Możliwość modyfikacji funkcji hemoglobiny w mikrokapsułkach poprzez dołączenie wybranych enzymów erytrocytarnych;</li> <li>▪Możliwość jednoczesnego transportu substancji leczniczych w mikrokapsułkach z hemoglobina</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Niedostateczna liczba danych dotyczących powikłań, takich jak aktywacja układu dopełniacza czy eliminacja mikrokapsulek przez układ siateczkowo-śródbłonkowy;</li> <li>▪Brak wejścia na etap badań klinicznych;</li> <li>▪Wysoka złożoność technologiczna, która wydłuża czas potrzebny na opracowanie finalnych produktów</li> </ul>

**Postępy i wyzwania w rozwoju sztucznej krwi.** Od ponad stu lat trwają intensywne badania nad opracowaniem sztucznej krwi, której potencjalne zastosowanie mogłoby przynieść korzyści w medycynie klinicznej. Mimo znacznego postępu w dziedzinie nauk medycznych i technologii, jak dotąd nie udało się stworzyć uniwersalnego i w pełni akceptowanego substytutu krwi ludzkiej (Khan et al., 2020). Poniżej przedstawiono niektóre z produktów, które są aktualnie przedmiotem badań klinicznych:

1. **HemAssist.** Jest to pierwszy nowoczesny nośnik tlenu opracowany przez firmę Baxter (USA) we współpracy z amerykańską armią. Produkt stanowił tetrameryczną hemoglobinę, w której dwie podjednostki  $\alpha$  ( $\alpha$ - $\alpha$ ) zostały usieciowane za pomocą 2,3-diaspiryny, pozyskiwanej z przeterminowanej ludzkiej krwi (Sloan et al., 1999). HemAssist był dobrze tolerowany przez pacjentów w badaniach klinicznych fazy I i II. Ponadto, w badaniach fazy III wykazano jego działanie oszczędzające krew. Jednakże u pacjentów chirurgicznych uczestniczących w tej fazie zaobserwowano zwiększone ryzyko zapalenia trzustki oraz zawału mięśnia sercowego. W badaniach fazy III wśród pacjentów urazowych przeprowadzonych w Stanach Zjednoczonych stwierdzono wyższą śmiertelność w grupie leczonej w porównaniu do grupy kontrolnej, choć w badaniach europejskich tej samej fazy śmiertelność rozkładała się bardziej równomiernie między grupami. Program badawczy HemAssist został zakończony w 1999 roku (Sloan et al., 1999; Chen et al., 2023).

2. **PolyHem.** PolyHeme to produkt opracowany przez Northfield Laboratories (Evanston, IL, USA) po zakończeniu wojny w

Wietnamie, wykorzystujący przeterminowaną ludzką krew jako surowiec. PolyHeme przeszedł wszystkie etapy badań klinicznych – fazy I, II i III. Produkt skutecznie podnosił poziom hemoglobiny w osoczu u pacjentów, którzy zamiast przetoczenia allogenicznej krwi ludzkiej otrzymywali PolyHeme. Niemniej jednak, w badaniach klinicznych fazy III, PolyHeme nie spełnił kryteriów w odniesieniu do 30-dniowej śmiertelności. W maju 2009 roku FDA odrzuciła wniosek o udzielenie licencji biologicznej na dopuszczenie produktu do obrotu. W wyniku tego Northfield Laboratories ogłosiło upadłość, co zakończyło drogę tego produktu do zastosowania klinicznego (Chen et al., 2023).

3. **HemoLink.** HemoLink został opracowany przez firmę Hemosol Inc. (Mississauga, Kanada) jako unikalny roztwór hemoglobiny zawierający stabilizowane tetrameryczne jednostki hemoglobiny A, które zostały usieciowane przy użyciu polialdehydowych polimerów o-rafinozy (Prempeh and Cheng, 2022). Produkt wykazywał obiecujące wyniki w badaniach klinicznych fazy III, ratując życie niektórym pacjentom. Niemniej jednak, HemoLink nie uzyskał pozwolenia na dopuszczenie do obrotu w Kanadzie. W 2003 roku Hemosol wstrzymał badania kliniczne, a w 2005 roku ogłosił upadłość (Jahr et al., 2021).

4. **Hemopure (Hb-201, Oxyglobin).** Hemopure został opracowany przez korporację Biopure (Cambridge, MA, USA) jako chemicznie stabilizowana, usieciowana hemoglobina bydlęca rozpuszczona w roztworze soli, przeznaczona do zastosowania u ludzi. Firma Biopure opracowała także analogiczny produkt pod nazwą Oxyglobin, zatwierdzony do stosowania weterynaryjnego u psów w USA w 1997 roku, a w Europie w 1998 roku. Hemopure uzyskał

aprobate w Republice Południowej Afryki w 2001 roku oraz w Rosji w 2006 roku (Waters et al., 2022). Dodatkowo produkt uzyskał w USA zgodę FDA na zastosowanie rozszerzone.

Hemopure był oceniany w badaniach klinicznych w kardiologii, gdzie wykazano wzrost natlenienia i perfuzji wieńcowej. Produkt wyróżnia się zdolnością do dostarczania tlenu do tkanek niedokrwionych bez potrzeby pulsacyjnego przepływu krwi, co jest możliwe dzięki małej wielkości polimeru i wyjątkowej zdolności do wiązania tlenu w płucach oraz jego uwalniania na poziomie tkankowym. Hemopure wydawał się bezpieczny u pacjentów poniżej 80. roku życia, którzy nie cierpieli na ciężkie choroby współistniejące.

Niestety, firma Biopure Corporation nie uzyskała pełnej aprobaty FDA na stosowanie kliniczne produktu, co doprowadziło do ogłoszenia ochrony przed bankructwem w 2009 roku. W tym samym roku firma sprzedała swoje aktywa OPK BioTech (Cambridge, MA, USA), a w 2014 roku produkt został przejęty przez Hemoglobin-O<sub>2</sub> Therapeutics (Souderton, PA, USA). Nowy właściciel kontynuował rozwój Hemopure.

Jedno z niedawnych badań sponsorowanych przez Hemoglobin-O<sub>2</sub> Therapeutics wykazało, że Hemopure może potencjalnie przywracać krążenie mózgowe oraz funkcje komórkowe do czterech godzin po śmierci w modelach zwierzęcych. Wyniki opublikowane w kwietniowym numerze czasopisma Nature w 2019 roku pokazały znaczące zmniejszenie śmierci komórek oraz przywrócenie niektórych funkcji komórek mózgowych, w tym spontanicznej aktywności synaptycznej. Hemopure był kluczowym składnikiem w procesie dostarczania tlenu do mózgu. Dalsze badania nad dynamiką regeneracji komórek po przedłużonym globalnym niedokrwieniu potwierdziły wstępne dane przedkliniczne i kliniczne, które wykazały zdolność Hemopure do perfuzji narządów, takich jak nerki i wątroba. Sugeruje to, że Hemopure może potencjalnie zastąpić koncentraty krwinek czerwonych w transplantologii narządów (Waters et al., 2022; Chen et al., 2023).

**5. HemO<sub>2</sub>life.** HemO<sub>2</sub>life został opracowany przez firmę Hemarina we Francji jako produkt oparty na naturalnej hemoglobinie zewnątrzkomórkowej wyizolowanej z pierścienicy morskiej *Arenicola marina*. Unikalne cechy tego produktu czynią go potencjalnym nowym środkiem terapeutycznym, zapewniającym natlenienie tkanek w różnych sytuacjach

klinicznych (Zal et al., 2022). HemO<sub>2</sub>life jest także stosowany do konserwacji narządów dawcy przed transplantacją, wspierając ich funkcjonowanie w warunkach przedklinicznych i klinicznych, co zostało zatwierdzone w Unii Europejskiej. Produkt okazał się bezpieczny jako dodatek do roztworów konserwujących narządy, a także ma korzystny wpływ na urazy niedokrwienno-reperfuzyjne. Posiada liczne potencjalne zalety w praktyce klinicznej i innych zastosowaniach (Zal et al., 2022).

Pierścienica morska *Arenicola marina* to gatunek bardzo stary, który istnieje na Ziemi od 450 milionów lat i kolonizuje obszary międzybrzegowe wschodniego wybrzeża Atlantyku, od Morza Północnego po Biarritz. HemO<sub>2</sub>life posiada kilka unikalnych właściwości:

- naturalna hemoglobina zewnątrzkomórkowa, spolimeryzowana o masie cząsteczkowej około 50 razy większej niż hemoglobina ludzka,
- funkcjonalne właściwości wiązania i uwalniania tlenu podobne do hemoglobiny ludzkiej,
- zdolność do wiązania 156 cząsteczek tlenu w porównaniu do 4 w przypadku hemoglobiny ludzkiej,
- naturalne właściwości antyoksydacyjne dzięki wrodzonej aktywności podobnej do dysmutazy ponadtlenkowej.

W przyszłości istnieje nadzieja, że HemO<sub>2</sub>life uzyska aprobatę do leczenia niedokrwistości w Unii Europejskiej oraz innych krajach. Produkt ten był także testowany u pacjentów z COVID-19 i wykazano, że może zwiększać zawartość tlenu w tętnicach w sytuacji, gdy wymiana gazowa w płucach była niewystarczająca, ponieważ wiązanie i uwalnianie tlenu zachodziło biernie w prostym gradiencie tlenu. HemO<sub>2</sub>life mogło poprawiać przeżywalność pacjentów z COVID-19, minimalizując konieczność intubacji dotchawiczej, skracając czas suplementacji tlenowej i umożliwiając leczenie wielu pacjentów w warunkach niedoboru respiratorów (Lupon et al., 2021).

**6. Pęcherzyki hemoglobinowe (HbV).** Pęcherzyki hemoglobinowe (ang. *Hemoglobin vesicles*, HbV) to strukturalne nośniki hemoglobiny o konfiguracji komórkowej, zawierające oczyszczony i skoncentrowany roztwór hemoglobiny zamknięty w pegylowanych pęcherzykach fosfolipidowych. HbV mają konfigurację liposomów, a ich średnica cząsteczek wynosi od 225 do 285 nm, co pozwala na neutralizację potencjalnie toksycznych efektów działania

cząsteczek hemoglobiny dzięki sztucznej dwuwarstwie lipidowej, imitującej błonę komórkową erytrocytów (Sakai et al., 2022).

Pęcherzyki hemoglobinowe zostały szeroko opisane jako płyn resuscytacyjny w modelach zwierzęcych, a także w badaniach dotyczących farmakokinetyki, biodystrybucji, wydalania, odpowiedzi immunologicznej oraz hematologii. Pierwsze badanie kliniczne fazy I na ludziach, przeprowadzone w latach 2020–2021, miało na celu ocenę bezpieczeństwa i farmakokinetyki HbV. Wyniki wykazały, że produkt ten jest bezpieczny i skuteczny. HbV mogą potencjalnie znaleźć zastosowanie jako alternatywa dla transfuzji krwi allogenicznej, a także w terapii tlenowej i tlenkiem węgla, jako perfuzat do organów przeznaczonych do transplantacji oraz jako fotosensybilizator (Frost et al., 2018; Sakai et al., 2022). Grupa dr. Sakaiego w Japonii uzyskała również zezwolenie na przeprowadzenie badania klinicznego fazy I (Sakai et al., 2022).

7. **Optro.** Optro zostało opracowane przez Somatogen Inc. w San Diego (Kalifornia, USA) oraz Eli Lilly w Indianapolis (Indiana, USA). Jest to genetycznie modyfikowana, rekombinowana hemoglobina, usieciowana glicyną. Optro to produkt uzyskiwany dzięki technologii rekombinowanego DNA, w której zmodyfikowane geny ludzkiej hemoglobiny były eksprymowane w komórkach, takich jak *Escherichia coli* i drożdże (Jahr et al., 2021; Burhop, 2022).

Niektóre sekwencje aminokwasowe naturalnych genów ludzkiej hemoglobiny zostały zmodyfikowane w celu zminimalizowania dysocjacji cząsteczek hemoglobiny na dimery w krwiobiegu oraz zachowania ich powinowactwa do tlenu podczas stosowania technologii rekombinowanego DNA. Geny hemoglobiny wprowadzano do komórek *E. coli* za pomocą wektora plazmidowego, a ekspresja tych genów indukowała produkcję białka hemoglobiny wewnątrz komórek *E. coli*. Technika ta nie jest tania, a wysoki koszt produkcji stanowi jedno z głównych wyzwań dla masowej produkcji hemoglobiny. Optro było pierwszym produktem w tej kategorii (Burhop, 2022).

Przyszłe badania będą ukierunkowane na wybór różnych kombinacji wielu mutacji, które ograniczyłyby wychwytywanie tlenu azotu, degradację oksydacyjną i denaturację, nie wpływając negatywnie na dostarczanie tlenu (Burhop, 2022). Okres półtrwania Optro wynosił od 2 do 19 godzin. Chociaż produkt był względnie dobrze tolerowany przez pacjentów, nie spełnił kryteriów FDA i został wycofany w

1999 roku z powodu wychwytywania tlenu azotu.

8. **Hemospan.** Hemospan, opracowany przez Sangart Inc. w San Diego (Kalifornia, USA), to hemoglobina ludzka sprzężona z glikolem polietylenowym (PEG), charakteryzująca się zwiększonym rozmiarem cząsteczek i poprawionymi właściwościami powinowactwa do tlenu. Wstępne badania kliniczne przyniosły obiecujące wyniki, a Hemospan nie powodował poważnego skurczu naczyń, jak inne produkty z grupy HBOC. Jest to wynikiem sprzężenia hemoglobiny z rozpuszczalnym polimerem PEG. Dzięki wysokiemu poziomowi uwodnienia roztworów PEG, cząsteczki hemoglobiny mają większy promień cząsteczkowy, co uniemożliwia im przechodzenie przez połączenia międzykomórkowe. Hemospan ma więc mniejszy wpływ na wychwytywanie tlenu azotu oraz powoduje mniejsze skurcze naczyń i nadciśnienie.

Mimo obiecujących wyników, Hemospan nie spełnił wymagań klinicznych w III fazie badań jako substytut krwi i został wycofany w 2015 roku (Smani, 2008). W badaniach fazy I i II był dobrze tolerowany przez ochotników i pacjentów, nie powodując poważnych działań niepożądanych, takich jak nadciśnienie czy zaburzenia żołądkowo-jelitowe. Dwa badania III fazy, przeprowadzone w Europie i USA, porównywały Hemospan z Voluvenem pod kątem efektywności w wypełnianiu objętości wewnątrzoperacyjnej oraz prewencji hipotensji. Wyniki tych badań nie spełniły oczekiwań, a uważa się, że projekt badań klinicznych nie był odpowiednio zaplanowany. Hemospan nie został opracowany głównie jako środek wypełniający objętość, lecz jako terapeutyczny środek tlenowy (Smani, 2008).

9. **Sanguitate.** Sanguitate, opracowane przez Prolong Inc. w South Plainfield (New Jersey, USA), to unikalna forma hemoglobiny bydłowej zmodyfikowanej PEG. Reprezentuje najnowszą generację nośników tlenu opartych na hemoglobinie. PEGylacja hemoglobiny w warunkach tlenowych znacząco zmienia jej właściwości strukturalne i funkcjonalne, aktywując dysocjację tetrameru, zwiększając powinowactwo do tlenu i eliminując kooperatywność wiązania tlenu (Romito et al., 2022). PEGylacja w warunkach beztlenowych prowadzi do powstania HBOC o niskim powinowactwie do tlenu, które zachowuje kooperatywność wiązania tlenu, nie powoduje nadciśnienia w modelu zwierzęcym i w 99% pozostaje w osoczu przez 6 godzin. W

sytuacjach, w których w tkankach występują bardzo niskie napięcia tlenu, HBOC o wysokim powinowactwie może optymalizować jego dostarczanie (Romito et al., 2022).

Strukturalne cechy Sanguinate i zmienne powinowactwo hemoglobiny do tlenu pozwalają omijać przeszkody w mikrokrążeniu, skutecznie dostarczając tlen do niedokrwionych tkanek (Cooper et al., 2021). Sanguinate ma także zdolność do endogennego dostarczania tlenku węgla, który zmniejsza stan zapalny, łagodzi uszkodzenia związane z reperfuzyją niedokrwioną oraz aktywuje rozszerzenie naczyń krwionośnych.

Chociaż opublikowano tylko wyniki badań fazy I, zakończono także kilka badań fazy II, które sugerowały możliwe ryzyko uszkodzenia mięśnia sercowego, choć nie wskazywały jednoznacznie na to, że było to spowodowane przez Sanguinate. Konieczne są większe badania, aby dokładniej zbadać ten związek przyczynowy. Sanguinate zostało użyte w sytuacjach awaryjnych u ponad 100 pacjentów z ciężką anemią, gdzie transfuzja krwi była przeciwwskazana. Dodatkowe efekty terapeutyczne, takie jak przeciwzapalne, przeciwskurczowe i zwiększające objętość osocza, mogą sprawić, że Sanguinate będzie użyteczne w leczeniu zaburzeń, w których krew jest nieskuteczna, takich jak udar, choroby zapalne czy posocznica. Z tego względu Sanguinate jest bardziej określane jako płyn resuscytacyjny (Cooper et al., 2021).

10. **HemoxiMer.** HemoxiMer, opracowany przez Apex Bioscience w Karolinie Północnej (USA), to chemicznie zmodyfikowana ludzka hemoglobina, będąca koniugatem hemoglobiny pirodyksalowanej i poliolefiny etylenowej (PHP). Z tego powodu HemoxiMer bywa określany jako PHP/HemoxiMer. Początkowo opracowywano go jako preparat do terapii tlenowej opartej na hemoglobinie, jednak później skoncentrowano się na jego zastosowaniu jako pochłaniacza tlenku azotu w stanach patologicznych charakteryzujących się wysokim poziomem tego gazu (Priavalle and De Angelo, 2022).

HemoxiMer przeszedł badania kliniczne fazy I i II, a dwa badania fazy III (jedno w USA, drugie w UE) zostały częściowo ukończone. Niestety, z powodu niepowodzenia w fazie III rozwój HemoxiMeru został wstrzymany. Mimo to badania kliniczne wykazały, że HemoxiMer wykazuje aktywność jako pochłaniacz tlenku azotu (Wollocko et al., 2022).

11. **OxyVita.** OxyVita to nowej generacji polimerowy HBOC, opracowany na bazie hemoglobiny wołowej. Została pierwotnie wynaleziona na Uniwersytecie Maryland w 1999 roku, a następnie rozwijana przez OXYVITA Inc. w Middletown (NY, USA). Produkcja OxyVita opiera się na opatentowanej technologii polimeryzacji bezpośredniej (*zero-link polymerization technology*), w której zamiast środków wiążących używa się aktywatorów, prowadzących do stworzenia superpolimeru złożonego z tetramerów hemoglobiny. OxyVita to superpolimer o masie cząsteczkowej około 17 MDa.

Celem opracowania OxyVita była poprawa dostarczania tlenu w sytuacjach, w których transfuzja krwinek czerwonych była potrzebna, ale niedostępna lub niepożądana. Produkt zaprojektowano z myślą o eliminacji problemów związanych z wcześniejszymi, nieskutecznymi HBOC (Wollocko et al., 2022). OxyVita była testowana przez wiele niezależnych zespołów badawczych w różnych instytucjach przez ostatnie dwie dekady (Abutarboush et al., 2014), a niektóre projekty badawcze są nadal aktywnie prowadzone.

Mimo licznych prób i częściowych sukcesów pełne zatwierdzenie produktów jako substytutów krwi ludzkiej wciąż pozostaje wyzwaniem. Technologie te napotykają trudności związane z ograniczeniami technologicznymi, regulacyjnymi i finansowymi. Konieczne są dalsze badania, które pozwolą na opracowanie skutecznych, bezpiecznych i dostępnych rozwiązań, odpowiadających na rosnące potrzeby kliniczne.

**Wybrane aspekty badań nad sztuczną krwią: ograniczenia, postępy i perspektywy rozwoju.** Pomimo zaawansowanych badań nad sztuczną krwią, technologia ta nie jest jeszcze w stanie w pełni zastąpić wszystkich funkcji krwi ludzkiej, szczególnie w zakresie efektywnego transportu tlenu do tkanek, co stanowi podstawową funkcję krwi. Choć wyniki dotychczasowych badań są obiecujące, nadal nie udało się opracować substytutu, który byłby całkowicie bezpieczny dla organizmu ludzkiego. Stosowane preparaty krwiopochodne często prowadzą do poważnych komplikacji zdrowotnych.

**Skutki uboczne i ograniczenia substytutów krwi:**

- Związki perfluorowęglowe – Metabolity tych substancji mogą pozostawać w organizmie przez wiele miesięcy, co wiąże się z ryzykiem obniżenia liczby płytek krwi, gorączki oraz

zwiększenia ryzyka udarów mózgu. Charakteryzują się także krótkim czasem przechowywania oraz ograniczoną efektywnością w transporcie tlenu (Pidcoke et al., 2022)

▪ Substytuty na bazie hemoglobiny – Preparaty oparte na hemoglobinie powodują zwężenie naczyń krwionośnych, co prowadzi do niedotlenienia tkanek oraz nadciśnienia ogólnoustrojowego i płucnego. Ponadto, substytuty te intensyfikują produkcję wolnych rodników tlenowych, przyczyniając się do stresu oksydacyjnego. Inne skutki uboczne to nefrotoksyczność, zaburzenia żołądkowo-jelitowe oraz objawy grypopodobne (Yu et al., 2009; Khan et al., 2020).

Ograniczenia substytutów krwi obejmują także ich krótki czas działania – większość preparatów opartych na hemoglobinie utrzymuje się w organizmie tylko przez 20–30 godzin, podczas gdy pełna krew może funkcjonować przez około 34 dni. Dodatkowo, substytuty te nie potrafią odtworzyć zdolności krwi do zwalczania infekcji oraz tworzenia skrzepów, co ogranicza ich zastosowanie do interwencji krótkoterminowych (Baron, 1999).

**Postępy w badaniach nad sztuczną krwią.** Mimo licznych trudności związanych z opracowaniem pełnoprawnego substytutu krwi ludzkiej, prace badawcze wciąż trwają, a nowe rozwiązania technologiczne i biotechnologiczne wykazują obiecujące właściwości.

1. **Erythromer** – Innowacyjna biosyntetyczna hemoglobina w postaci nanokapsułek lipidowo-peptydowych, które kapsułkują hemoglobinę ludzką. Produkt ten charakteryzuje się długim okresem przydatności oraz możliwością szybkiej rekonstrukcji, co czyni go szczególnie przydatnym w warunkach bojowych. Erythromer znajduje się obecnie w fazie badań przedklinicznych, a testy kliniczne planowane są na koniec 2024 roku (ErythroMer, 2024).

2. **NanoSanguis** – Polska firma opracowuje syntetyczne mikrocząsteczki imitujące erythrocyty, które mogą pełnić funkcję czasowego substytutu krwi ludzkiej w przypadku jej znacznej utraty (<https://nawa.gov.pl>; <https://ec.europa.eu/>).

3. **Alternatywne źródła hemoglobiny** – Zainteresowanie budzi hemoglobina pozyskiwana z organizmów bezkręgowców, takich jak dżdżownice (*Lumbricus terrestris*) czy wieloszczety morskie (*Arenicola marina*). Hemoglobina tych organizmów nie posiada błony komórkowej, co czyni ją potencjalnym nośnikiem tlenu w ludzkiej krwi. Badania

wstępne wykazały jej bezpieczeństwo u zwierząt laboratoryjnych (Batoool et al., 2021).

Hemoglobina *Arenicola marina* (M101), znana komercyjnie jako HEMO<sub>2</sub>life<sup>®</sup> produkowana przez firmę Hemarina (Morlaix, Francja), efektywnie dostarcza tlen *in vivo* (Le Gall et al., 2014; Moon-Massat et al., 2017). Badania wykazały, że nie powoduje ona utleniania, skurczu naczyń ani nadciśnienia (Rousselot et al., 2006; Tsai et al., 2012). Dzięki dużym kieszeniom hemowym w cząsteczce hemoglobiny *A. marina*, tlen jest łatwo i pasywnie uwalniany (Gow et al., 2005; Xu et al., 2006). Należy zaznaczyć, że hemoglobina *A. marina* ma znacznie wyższe powinowactwo do tlenu niż hemoglobina ludzka, co wynika z jej niższej wartości p<sub>50</sub> wynoszącej 7,05 ± 0,93 mmHg. Dzięki temu, jej zdolność do dostarczania tlenu jest skierowana na bardziej hipoksyczne środowiska (Elmer et al., 2012). Co ciekawe, wartość p<sub>50</sub> M101 jest porównywalna z wartością p<sub>50</sub> hemoglobiny ludzkiej HbA wewnątrz erythrocytów, a jej kooperatywność również wykazuje podobne właściwości (Elmer et al., 2012; Batoool et al., 2021).

M101 wykazała swoją skuteczność jako dodatek do roztworów stosowanych do konserwacji narządów zarówno w warunkach statycznych, jak i perfuzyjnych, w trakcie przeszczepów narządów. Liczne badania *in vivo* na modelach przedklinicznych, obejmujące różne narządy, takie jak serce (Mallet et al., 2014), nerki (Jia et al., 2004; Alix et al., 2020), wątroba (Lemaire et al., 2019), trzustka (Thuillier et al., 2011) i płuca (Glorion et al., 2018), potwierdziły zdolność M101 do utrzymania oraz poprawy żywotności i funkcji przeszczepów.

Bezpieczeństwo i skuteczność M101 zostały także potwierdzone w badaniu klinicznym OXYOP (Clinical Trial Registry No. NCT 02652520), które dotyczyło procedury przeszczepu nerki. W badaniu tym dodano HEMO<sub>2</sub>life<sup>®</sup> – wyrób medyczny klasy III zawierający M101 (1 g/L) – do roztworu konserwującego (Le Meur et al., 2020). Ważne jest, że nie zaobserwowano żadnych działań immunologicznych, alergicznych ani prozakrzepowych związanych z użyciem M101. Ponadto, zastosowanie M101 zmniejszyło ryzyko opóźnionej funkcji przeszczepu i poprawiło funkcję nerek (Le Meur et al., 2020). Wyniki te potwierdzają bezpieczeństwo i skuteczność M101 oraz wskazują na jej potencjalne zastosowania kliniczne. Dodatkowo, M101 została zaproponowana jako natychmiastowy substy-



tut krwi dla rannych żołnierzy armii USA (Sen Gupta, 2019).

Interesującym przypadkiem wykorzystania HEMO<sub>2</sub>life<sup>®</sup> była jej aplikacja w celu ochrony przeszczepu twarzy podczas retransplantacji całkowitej twarzy. W styczniu 2018 roku przeprowadzono transplantację, wykorzystując przeszczep zabezpieczony za pomocą HEMO<sub>2</sub>life<sup>®</sup>. Operacja zakończyła się sukcesem, a 30 miesięcy po zabiegu pacjent pozostaje w dobrym stanie, bez oznak odrzutu przeszczepu (Lantieri et al., 2020). Niedawno M101 zaproponowano również jako "molekularny respirator", potencjalne wsparcie dla pacjentów z COVID-19 w walce z hipoksemią (Lupon et al., 2021). Przeprowadzenie badań nad tą hipotezą może być kluczowe dla opracowania potencjalnej strategii terapeutycznej zwalczającej kryzys związany z COVID-19.

Z uwagi na interesującą zdolność transportu O<sub>2</sub>, potencjał M101 jako transportera tlenu w różnych patologiach związanych z hipokseją wymaga szczegółowych badań. Ponadto, jego możliwości jako terapeutycznego nośnika tlenu w sytuacjach związanych z masywnym krwotokiem, takich jak wypadki, ataki terrorystyczne czy urazy wojenne, powinny być dogłębnie zbadane. Potencjalne użycie M101 jako tymczasowej lub interwencyjnej alternatywy w celu ograniczenia niepożądanych skutków ubocznych patologii wymagających częstych transfuzji krwi wymaga dalszych badań. Dodatkowo, biorąc pod uwagę niedawno odkryte właściwości przeciwzapalne i antybakteryjne tego związku, konieczne są dalsze badania nad jego potencjałem terapeutycznym w leczeniu chorób zapalnych i infekcyjnych (Batoool et al., 2021).

Aby sztuczna krew była bezpieczna i skuteczna, kluczowe są odpowiednie metody poprawy jej stabilności oraz redukcji toksyczności. Jednym z najważniejszych podejść jest modyfikacja chemiczna hemoglobiny, na przykład poprzez PEGylację, która zwiększa jej stabilność oraz zmniejsza immunogenność, ograniczając ryzyko niepożądanych reakcji organizmu. Kolejnym rozwiązaniem jest wykorzystanie nanotechnologii do kapsułkowania hemoglobiny w biokompatybilnych nośnikach, co zapobiega jej toksycznemu utlenianiu i przedłuża czas działania w organizmie (Gomes et al., 2024).

Lepsze systemy buforujące odgrywają istotną rolę w regulacji pH oraz eliminacji wolnych rodników, które mogą prowadzić do cytotoksyczności. Dzięki temu możliwe jest

zmniejszenie negatywnego wpływu sztucznej krwi na organizm. Ponadto, optymalizacja składu perfluorowęglowodorów pozwala na zapewnienie lepszej rozpuszczalności tlenu, jednocześnie minimalizując ryzyko działań niepożądanych. Wszystkie te metody wspólnie przyczyniają się do zwiększenia efektywności i bezpieczeństwa sztucznej krwi, przybliżając jej praktyczne zastosowanie w medycynie (Gomes et al., 2024).

**Potencjalne zastosowania substytutów krwi.** Badania nad substytutami krwi sugerują, że mogą one być wykorzystywane w wielu dziedzinach medycyny i nauki, w tym do:

- leczenia urazów mózgu i niedokrwienia mięśnia sercowego,
- poprawy utlenowania tkanek w przewlekłej niewydolności tętniczej,
- pozaustrojowej perfuzji narządów przeznaczonych do transplantacji,
- zwiększenia efektywności radioterapii nowotworów przez lepsze utlenowanie guzów (Dong and Stowell, 2002).

Produkcja sztucznej krwi jest obecnie procesem kosztownym, co stanowi jedno z największych wyzwań w jej komercjalizacji. Koszty hodowli erytrocytów z komórek macierzystych są wysokie ze względu na konieczność stosowania specjalistycznych mediów hodowlanych oraz długotrwały proces namnażania komórek. Dodatkowo technologie oparte na syntetycznych nośnikach tlenu wymagają kosztownych badań nad ich stabilnością i bezpieczeństwem.

Obecnie produkcja jednostki sztucznej krwi znacząco przewyższa koszty standardowej transfuzji, jednak rozwój technologii i zwiększenie skali produkcji mogą w przyszłości obniżyć te wydatki. Istnieje także potrzeba dalszych inwestycji w innowacyjne metody wytwarzania oraz optymalizację procesów produkcyjnych. Długoterminowo, sztuczna krew może stać się opłacalnym rozwiązaniem, zwłaszcza w kontekście rosnącego zapotrzebowania na bezpieczne alternatywy dla tradycyjnych transfuzji.

**Perspektywy rozwoju.** Pomimo wcześniejszych niepowodzeń, badania nad sztuczną krwią są kontynuowane. Przyszłość tej technologii może obejmować nie tylko opracowanie skutecznych i bezpiecznych substytutów krwi, ale także rozwój innowacyjnych rozwiązań, takich jak sztuczne płytki krwi, białe krwinki czy erytrocyty produkowane z komórek macierzystych. Innowacje te mogą stanowić

odpowiedź na aktualne problemy związane z toksycznością i ograniczoną efektywnością istniejących preparatów (Kresie, 2001; Sarkar, 2008; Gomes et al., 2024).

Rozwój technologii sztucznej krwi wymaga intensywnych badań nad zwiększeniem efektywności syntetycznych nośników tlenu, optymalizacją biotechnologicznej produkcji erytrocytów oraz udoskonaleniem biomimetycznych rozwiązań opartych na nanotechnologii. Postęp w tych obszarach może przyczynić się do stworzenia alternatywnych źródeł krwi o wysokiej skuteczności klinicznej i szerokim zastosowaniu medycznym (Gomes et al., 2024).

Kluczowe technologie wymagające udoskonalenia obejmują syntetyczne nośniki tlenu, biotechnologiczną produkcję erytrocytów oraz wykorzystanie nanotechnologii i biomateriałów. Syntetyczne nośniki tlenu, takie jak perfluorowęglowodory i hemoglobina rekombinowana, stanowią jedną z najbardziej obiecujących metod zastępowania naturalnych krwinek czerwonych. Jednak ich ograniczona zdolność do przenoszenia tlenu w sposób porównywalny do naturalnych erytrocytów oraz krótki czas krążenia w organizmie stanowią istotne bariery technologiczne. Konieczne jest dalsze udoskonalanie tych związków, aby zwiększyć ich efektywność oraz ograniczyć działania niepożądane (Gomes et al., 2024).

Biotechnologiczna produkcja erytrocytów z komórek macierzystych jest kolejną innowacyjną strategią, jednak jej wdrożenie na skalę kliniczną napotyka na poważne trudności. Główne wyzwania obejmują niską wydajność produkcji krwinek oraz wysokie koszty hodowli. Optymalizacja procesów namnażania komórek, automatyzacja produkcji oraz rozwój bardziej efektywnych bioreaktorów mogą znacząco poprawić opłacalność tej technologii (Gomes et al., 2024).

Nanotechnologia i biomateriały stanowią perspektywiczne podejście do opracowania biomimetycznych erytrocytów, które mogłyby naśladować naturalne funkcje czerwonych krwinek. Ich stabilność oraz kompatybilność z układem immunologicznym pozostają jednak kluczowymi wyzwaniami, które wymagają dalszych badań. W szczególności należy opracować innowacyjne powłoki ochronne oraz zoptymalizować ich strukturę, aby zapewnić odpowiednią funkcjonalność i bezpieczeństwo stosowania (Gomes et al., 2024).

**Wyzwania i ograniczenia w rozwoju substytutów krwinek czerwonych.** Wszystkie

substytuty krwinek czerwonych, które dotychczas przeszły badania kliniczne, zawierają składniki, które nie są strukturami komórkowymi. Podstawowe mechanizmy transportu tlenu różnią się od tych występujących w warunkach fizjologicznych. Te substytuty znikają z układu krążenia po kilku godzinach, w najlepszym przypadku po kilku dniach, co znacząco ogranicza możliwość ich praktycznego zastosowania. Brakuje pełnych danych dotyczących bezpieczeństwa ich stosowania (Kim and Greenburg, 2004; Cabrales and Intaglietta, 2013). W badaniach klinicznych wymagana jest szczególna ostrożność. Ocena skuteczności tych preparatów jest utrudniona z powodu braku powszechnie akceptowanych kryteriów oceny. Żaden z aktualnie badanych preparatów nie został dopuszczony do rutynowego stosowania u ludzi w Polsce, krajach Europy Zachodniej ani w Stanach Zjednoczonych (Cabrales and Intaglietta, 2013).

Hemopure, opracowany przez firmę Biopure Corp., zawiera chemicznie stabilizowaną, usieciowaną hemoglobinę wołową (krowią) w roztworze soli i jest przeznaczony do stosowania u ludzi. Firma ta opracowała także analogiczny produkt pod nazwą handlową Oxyglobin, przeznaczony do użytku weterynaryjnego u psów. Oxyglobin został zatwierdzony w Stanach Zjednoczonych i Europie, a jego wprowadzenie do klinik weterynaryjnych oraz szpitali miało miejsce w marcu 1998 roku. Hemopure uzyskał aprobatę w Republice Południowej Afryki oraz Rosji (Sprung et al., 2002; Jahr et al., 2021; Chen et al., 2023). Warto zaznaczyć, że istniały wcześniej inne produkty klinicznie zatwierdzone, jednak ich sprzedaż została przerwana z powodu skutków ubocznych (Chen et al., 2023).

Spośród produktów opartych na hemoglobinie do dostarczania tlenu, HemAssist, PolyHeme, Hemolink, Hemospan i Hemoximer zostały wycofane z użycia. Hemopure jest dopuszczony do stosowania klinicznego w Rosji i Republice Południowej Afryki, a jego bliźniaczy produkt Oxyglobin (ten sam skład co Hemopure, ale pod inną nazwą handlową) został zatwierdzony do użytku weterynaryjnego w Stanach Zjednoczonych oraz Unii Europejskiej (Jahr et al., 2021). HemO<sub>2</sub>life® niedawno uzyskał aprobatę do stosowania w konserwacji narządów podczas transplantacji w Unii Europejskiej, a jego twórcy starają się o zatwierdzenie tego produktu do leczenia ciężkich stanów anemii. Produkty OxyVita i Sanguinate pozostają nadal w aktywnej fazie badań klinicznych.

Można mieć nadzieję, że nadchodzące 10–20 lat przyniesie dynamiczny rozwój w dziedzinie terapii tlenowych (Chen et al., 2023).

Rozwój sztucznych krwinek czerwonych napotyka poważne trudności, głównie ze względu na działania niepożądane, takie jak toksyczność w organizmie. Istnieje kilka produktów, które uzyskały warunkową aprobatę w Rosji i Afryce, jednak ich stosowanie wiąże się z wysokim ryzykiem – śmiertelność w przypadku ich użycia sięga około 50% (Kim et al., 2008).

### Podsumowanie

Sztuczna krew, czyli substytuty krwinek czerwonych, stanowi obiecującą alternatywę dla tradycyjnych transfuzji krwi, szczególnie w sytuacjach, gdy dostęp do krwi jest ograniczony lub jej transfuzja jest niemożliwa. Mimo wielu lat intensywnych badań, rozwój sztucznej krwi napotkał szereg trudności związanych zarówno z technologią produkcji, jak i kwestiami bezpieczeństwa oraz skuteczności. Istniejące substytuty krwinek czerwonych, które przeszły badania kliniczne, charakteryzują się licznymi ograniczeniami, które nadal uniemożliwiają ich powszechne zastosowanie w medycynie.

Dotychczasowe substytuty krwinek czerwonych są oparte na komponentach bez struktury komórkowej, co stanowi podstawową różnicę w porównaniu do naturalnych krwinek czerwonych. Te syntetyczne substytuty pełnią funkcję transportu tlenu, jednak mechanizmy, które wykorzystują, znacznie odbiegają od fizjologicznych procesów zachodzących w organizmach ludzi. Ich skuteczność w przenoszeniu tlenu jest mniejsza, a dodatkowo czas ich obecności w układzie krążenia jest krótki. Większość substytutów znika z organizmu w ciągu kilku godzin, a w najlepszym przypadku – po kilku dniach, co znacznie ogranicza ich praktyczne zastosowanie w medycynie.

Brak pełnych danych na temat bezpieczeństwa stosowania substytutów krwi stanowi kolejny poważny problem. Chociaż niektóre preparaty uzyskały dopuszczenie do stosowania w wybranych krajach, takich jak RPA czy

Rosja, ich długoterminowe bezpieczeństwo oraz wpływ na organizm pozostają nie w pełni poznane. Wymaga to dalszych badań, które muszą być prowadzone z zachowaniem szczególnej ostrożności, aby nie narażać pacjentów na poważne skutki uboczne. Również ocena skuteczności sztucznej krwi jest utrudniona z powodu braku powszechnie uznawanych kryteriów oceny tego typu preparatów. Do tej pory nie opracowano jednoznacznych norm, które pozwoliłyby na porównanie skuteczności różnych substytutów krwinek czerwonych.

Pomimo tych trudności, niektóre preparaty, takie jak Hemopure, opracowany przez firmę Biopure Corp., osiągnęły pewne sukcesy. Hemopure, który zawiera usieciowaną hemoglobinę wołową w roztworze soli, uzyskał aprobatę do stosowania w Afryce Południowej i Rosji, choć jego użycie nadal wiąże się z ryzykiem. Dodatkowo, produkt Oxyglobin, przeznaczony do użytku weterynaryjnego, został zatwierdzony w Stanach Zjednoczonych i Europie, gdzie znalazł zastosowanie w leczeniu psów.

Należy również zauważyć, że w przeszłości istniały inne produkty sztucznej krwi, które otrzymały aprobatę, lecz ich sprzedaż została wstrzymana z powodu działań niepożądanych, takich jak toksyczność. Do tej pory nie udało się uzyskać preparatu, który mógłby być powszechnie stosowany u ludzi i zatwierdzony przez odpowiednie władze, takie jak FDA.

Obecny stan technologii substytutów krwinek czerwonych wskazuje na konieczność dalszego rozwoju i poszukiwania nowych, bardziej stabilnych oraz bezpiecznych produktów. Istnieje wiele potencjalnych możliwości, które mogą pozwolić na poprawę jakości sztucznej krwi. Jednak wyzwania związane z toksycznością, czasem przechowywania oraz kosztami produkcji wciąż pozostają trudne do przezwyciężenia. Z tego względu, choć sztuczna krew oferuje ogromny potencjał w medycynie, jej pełne wprowadzenie do powszechnego użytku może wymagać jeszcze wielu lat badań i dalszego rozwoju technologii.

### 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 / Conflicts of Interest**

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

**References**

- Abutarboush, R., Aligbe, C., Pappas, G., Saha, B., Arnaud, F., Haque, A., Aufer, C., McCarron, R., Scultetus, A., & Moon-Massat, P. (2014). Effects of the Oxygen-Carrying Solution OxyVita C on the Cerebral Microcirculation and Systemic Blood Pressures in Healthy Rats. *Journal of functional biomaterials*, 5(4), 246–258. <https://doi.org/10.3390/jfb5040246>
- Alix, P., Val-Laillet, D., Turlin, B., Ben Mosbah, I., Burel, A., Bobillier, E., Bendavid, C., Delpy, E., Zal, F., Corlu, A., & Boudjema, K. (2020). Adding the oxygen carrier M101 to a cold-storage solution could be an alternative to HOPE for liver graft preservation. *JHEP reports: innovation in hepatology*, 2(4), 100119. <https://doi.org/10.1016/j.jhepr.2020.100119>
- Amberson, W. R., Jennings, J. J., & Rhode, C. M. (1949). Clinical experience with hemoglobin-saline solutions. *Journal of applied physiology*, 1(7), 469–489. <https://doi.org/10.1152/jappl.1949.1.7.469>
- Amberson, W. R., Mulder, A. G., Steggerda, F. R., Flexner, J., & Pankratz, D. S. (1933). Mammalian life without red blood corpuscles. *Science (New York, N.Y.)*, 78(2014), 106–107. <https://doi.org/10.1126/science.78.2014.106>
- Arifin, D. R., & Palmer, A. F. (2005). Polymersome encapsulated hemoglobin: a novel type of oxygen carrier. *Biomacromolecules*, 6(4), 2172–2181. <https://doi.org/10.1021/bm0501454>
- Artificial Blood from the Warsaw University of Technology. <https://nawa.gov.pl/en/snapy/artificial-blood-from-the-warsaw-university-of-technology>
- Astruc, D., Boisselier, E., & Ornelas, C. (2010). Dendrimers designed for functions: from physical, photophysical, and supramolecular properties to applications in sensing, catalysis, molecular electronics, photonics, and nanomedicine. *Chemical reviews*, 110(4), 1857–1959. <https://doi.org/10.1021/cr900327d>
- Azuma, H., & Sakai, H. (2019). [Translational research for artificial red blood cells (hemoglobin vesicles)] [Rinsho ketsueki]. *The Japanese journal of clinical hematology*, 60(9), 1084–1091. <https://doi.org/10.11406/rinketsu.60.1084>
- Baron J. F. (1999). Blood substitutes. Haemoglobin therapeutics in clinical practice. *Critical care (London, England)*, 3(5), R99–R102. <https://doi.org/10.1186/cc365>
- Batool, F., Delpy, E., Zal, F., Leize-Zal, E., & Huck, O. (2021). Therapeutic Potential of Hemoglobin Derived from the Marine Worm *Arenicola marina* (M101): A Literature Review of a Breakthrough Innovation. *Marine drugs*, 19(7), 376. <https://doi.org/10.3390/md19070376>
- Biro, G. P., & Blais, P. (1987). Perfluorocarbon blood substitutes. *Critical reviews in oncology/hematology*, 6(4), 311–374. [https://doi.org/10.1016/s1040-8428\(87\)80018-5](https://doi.org/10.1016/s1040-8428(87)80018-5)

- Bloch, E. M., Vermeulen, M., & Murphy, E. (2012). Blood transfusion safety in Africa: a literature review of infectious disease and organizational challenges. *Transfusion medicine reviews*, 26(2), 164–180. <https://doi.org/10.1016/j.tmr.2011.07.006>
- Bobofchak, K. M., Mito, T., Texel, S. J., Bellelli, A., Nemoto, M., Traystman, R. J., Koehler, R. C., Brinigar, W. S., & Fronticelli, C. (2003). A recombinant polymeric hemoglobin with conformational, functional, and physiological characteristics of an *in vivo* O<sub>2</sub> transporter. *American journal of physiology. Heart and circulatory physiology*, 285(2), H549–H561. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00037.2003>
- Bonsen, P., Laver, M., Morris, K., inventors; Alza Corporation, assignee. Novel polymerized, cross-linked, stroma-free hemoglobin. United States, 1975
- Bowman R. J. (1983). Red blood cell substitutes and artificial blood. *Human pathology*, 14(3), 218–220. [https://doi.org/10.1016/s0046-8177\(83\)80020-3](https://doi.org/10.1016/s0046-8177(83)80020-3)
- Boykins, R. A., Buehler, P. W., Jia, Y., Venable, R., & Alayash, A. I. (2005). O-*raffinose* crosslinked hemoglobin lacks site-specific chemistry in the central cavity: structural and functional consequences of beta93Cys modification. *Proteins*, 59(4), 840–855. <https://doi.org/10.1002/prot.20453>
- Browdie, D., & Smith, H. (1975). Stroma-free hemoglobin. Simplified preparation and *in vivo* and *in vitro* effects on coagulation in rabbits. *American journal of surgery*, 129(4), 365–368. [https://doi.org/10.1016/0002-9610\(75\)90178-6](https://doi.org/10.1016/0002-9610(75)90178-6)
- Bunn, H. F., & Jandl, J. H. (1968). The renal handling of hemoglobin. *Transactions of the Association of American Physicians*, 81, 147–152
- Burhop K. (2022). Development of Recombinant Hemoglobin-Based Oxygen Carriers-Somatogen: Studies and Lessons Learned. In: Liu H., Kaye A.D., Jahr J.S., editors. *Blood Substitutes and Oxygen Biotherapeutics*. Springer
- Cabrales, P., & Intaglietta, M. (2013). Blood substitutes: evolution from noncarrying to oxygen- and gas-carrying fluids. *ASAIO journal (American Society for Artificial Internal Organs: 1992)*, 59(4), 337–354. <https://doi.org/10.1097/MAT.0b013e318291fbaa>
- Carmichael, F. J., Ali, A. C., Campbell, J. A., Langlois, S. F., Biro, G. P., Willan, A. R., Pierce, C. H., & Greenburg, A. G. (2000). A phase I study of oxidized *raffinose* cross-linked human hemoglobin. *Critical care medicine*, 28(7), 2283–2292. <https://doi.org/10.1097/00003246-200007000-00017>
- Chang T. M. (1992). Blood substitutes based on modified hemoglobin prepared by encapsulation or crosslinking: an overview. *Biomaterials, artificial cells, and immobilization biotechnology: official journal of the International Society for Artificial Cells and Immobilization Biotechnology*, 20(2-4), 159–179. <https://doi.org/10.3109/10731199209119634>
- Chang T. M. (2003). Future generations of red blood cell substitutes. *Journal of internal medicine*, 253(5), 527–535. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2796.2003.01151.x>
- Chang T. M. (2006). Blood substitutes based on nanobiotechnology. *Trends in biotechnology*, 24(8), 372–377. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2006.06.005>
- Chang, T. M., Powanda, D., & Yu, W. P. (2003). Analysis of polyethylene-glycol-poly lactide nano-dimension artificial red blood cells in maintaining systemic hemoglobin levels and prevention of methemoglobin formation. *Artificial cells, blood substitutes, and immobilization biotechnology*, 31(3), 231–247. <https://doi.org/10.1081/bio-120023155>

- Chen, J. Y., Scerbo, M., & Kramer, G. (2009). A review of blood substitutes: examining the history, clinical trial results, and ethics of hemoglobin-based oxygen carriers. *Clinics (Sao Paulo, Brazil)*, 64(8), 803–813. <https://doi.org/10.1590/S1807-59322009000800016>
- Chen, J., Pan, H., Lanza, G. M., & Wickline, S. A. (2013). Perfluorocarbon nanoparticles for physiological and molecular imaging and therapy. *Advances in chronic kidney disease*, 20(6), 466–478. <https://doi.org/10.1053/j.ackd.2013.08.004>
- Chen, L., Yang, Z., & Liu, H. (2023). Hemoglobin-Based Oxygen Carriers: Where Are We Now in 2023?. *Medicina (Kaunas, Lithuania)*, 59(2), 396. <https://doi.org/10.3390/medicina59020396>
- Clark, L. C., Jr, & Gollan, F. (1966). Survival of mammals breathing organic liquids equilibrated with oxygen at atmospheric pressure. *Science (New York, N.Y.)*, 152(3730), 1755–1756. <https://doi.org/10.1126/science.152.3730.1755>
- Cohn, C. S., & Cushing, M. M. (2009). Oxygen therapeutics: perfluorocarbons and blood substitute safety. *Critical care clinics*, 25(2). <https://doi.org/10.1016/j.ccc.2008.12.007>
- Cooper, C. E., Bird, M., Sheng, X., Choi, J. W., Silkstone, G. G. A., Simons, M., Syrett, N., Piano, R., Ronda, L., Bettati, S., Paredi, G., Mozzarelli, A., & Reeder, B. J. (2021). Stability of Maleimide-PEG and Mono-Sulfone-PEG Conjugation to a Novel Engineered Cysteine in the Human Hemoglobin Alpha Subunit. *Frontiers in chemistry*, 9, 707797. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.707797>
- Dellinger, E. P., & Anaya, D. A. (2004). Infectious and immunologic consequences of blood transfusion. *Critical care (London, England)*, 8 Suppl. 2(Suppl. 2), S18–S23. <https://doi.org/10.1186/cc2847>
- Dong, Q., & Stowell, C. P. (2002). Blood substitutes. What they are and how they might be used. *American journal of clinical pathology*, 118 Suppl., S71–S80. <https://doi.org/10.1309/6P2J-2B1K-GU0T-M5PR>
- Elmer, J., Palmer, A. F., & Cabrales, P. (2012). Oxygen delivery during extreme anemia with ultra-pure earthworm hemoglobin. *Life sciences*, 91(17-18), 852–859. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2012.08.036>
- ErythroMer: Nanoscale BioSynthetic Red Cell Substitute, 2024. Project Number 5R44HL135965-05; Former Number 2R44HL135965-04; Contact PI/Project Leader: ALP, ESMA; Awardee Organization: KALOCYTE, INC. Available: <https://reporter.nih.gov/project-details/10844356#details>
- Faggiano, S., Ronda, L., Bruno, S., Abbruzzetti, S., Viappiani, C., Bettati, S., & Mozzarelli, A. (2022). From hemoglobin allosterity to hemoglobin-based oxygen carriers. *Molecular aspects of medicine*, 84, 101050. <https://doi.org/10.1016/j.mam.2021.101050>
- Fronticelli, C., & Koehler, R. C. (2009). Design of recombinant hemoglobins for use in transfusion fluids. *Critical care clinics*, 25(2). <https://doi.org/10.1016/j.ccc.2008.12.010>
- Frost, A. T., Jacobsen, I. H., Worberg, A., & Martínez, J. L. (2018). How Synthetic Biology and Metabolic Engineering Can Boost the Generation of Artificial Blood Using Microbial Production Hosts. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 6, 186. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2018.00186>
- Gasparovic Babic, S., Krsek, A., & Baticic, L. (2024). Voluntary Blood Donation in Modern Healthcare: Trends, Challenges, and Opportunities. *Epidemiologia (Basel, Switzerland)*, 5(4), 770–784. <https://doi.org/10.3390/epidemiologia5040052>



- Glorion, M., Polard, V., Favereau, F., Hauet, T., Zal, F., Fadel, E., & Sage, E. (2018). Prevention of ischemia-reperfusion lung injury during static cold preservation by supplementation of standard preservation solution with HEMO<sub>2</sub>life® in pig lung transplantation model. *Artificial cells, nanomedicine, and biotechnology*, 46(8), 1773–1780. <https://doi.org/10.1080/21691401.2017.1392315>
- Gomes, F. L., Jeong, S. H., Shin, S. R., Leijten, J., & Jonkheijm, P. (2024). Engineering Synthetic Erythrocytes as Next-Generation Blood Substitutes. *Advanced functional materials*, 34(28), 2315879. <https://doi.org/10.1002/adfm.202315879>
- Gow, A. J., Payson, A. P., & Bonaventura, J. (2005). Invertebrate hemoglobins and nitric oxide: how heme pocket structure controls reactivity. *Journal of inorganic biochemistry*, 99(4), 903–911. <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2004.12.001>
- Graves, P. E., Henderson, D. P., Horstman, M. J., Solomon, B. J., & Olson, J. S. (2008). Enhancing stability and expression of recombinant human hemoglobin in *E. coli*: Progress in the development of a recombinant HBOC source. *Biochimica et biophysica acta*, 1784(10), 1471–1479. <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2008.04.012>
- Guidelines Review Committee. Towards 100% Voluntary Blood Donation: A Global Framework for Action. World Health Organization; Geneva, Switzerland: 2010. [(accessed on 7 October 2024)]. Available online: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241599696>
- Haldar, R., Gupta, D., Chitranshi, S., Singh, M. K., & Sachan, S. (2019). Artificial Blood: A Futuristic Dimension of Modern Day Transfusion Sciences. *Cardiovascular & hematological agents in medicinal chemistry*, 17(1), 11–16. <https://doi.org/10.2174/1871525717666190617120045>
- Hegedüs, I., Dojcsak, É.K.-T., Szalai, A.J., et al. (2014). Single haemoglobin nanocapsules as test materials for artificial blood. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 58(suppl.), 11
- Highsmith, F. A., Driscoll, C. M., Chung, B. C., Chavez, M. D., Macdonald, V. W., Manning, J. M., Lippert, L. E., Berger, R. L., & Hess, J. R. (1997). An improved process for the production of sterile modified haemoglobin solutions. *Biologicals: journal of the International Association of Biological Standardization*, 25(3), 257–268. <https://doi.org/10.1006/biol.1997.0096>
- Hill, S. E., Gottschalk, L. I., & Grichnik, K. (2002). Safety and preliminary efficacy of hemoglobin raffimer for patients undergoing coronary artery bypass surgery. *Journal of cardiothoracic and vascular anesthesia*, 16(6), 695–702. <https://doi.org/10.1053/jcan.2002.128416>
- Hoffman, S. J., Looker, D. L., Roehrich, J. M., Cozart, P. E., Durfee, S. L., Tedesco, J. L., & Stetler, G. L. (1990). Expression of fully functional tetrameric human hemoglobin in *Escherichia coli*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 87(21), 8521–8525. <https://doi.org/10.1073/pnas.87.21.8521>
- InformedHealth.org [Internet]. Cologne, Germany: Institute for Quality and Efficiency in Health Care (IQWiG); 2006-. In brief: What does blood do? [Updated 2023 Mar 16]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK279392/>
- Jägers, J., Wrobeln, A., & Ferenz, K. B. (2021). Perfluorocarbon-based oxygen carriers: from physics to physiology. *Pflugers Archiv: European journal of physiology*, 473(2), 139–150. <https://doi.org/10.1007/s00424-020-02482-2>

- Jahr, J. S., Guinn, N. R., Lowery, D. R., Shore-Lesserson, L., & Shander, A. (2021). Blood Substitutes and Oxygen Therapeutics: A Review. *Anesthesia and analgesia*, 132(1), 119–129. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000003957>
- Jahr, J. S., Walker, V., & Manoochchri, K. (2007). Blood substitutes as pharmacotherapies in clinical practice. *Current opinion in anaesthesiology*, 20(4), 325–330. <https://doi.org/10.1097/ACO.0b013e328172225a>
- Jansman, M. M. T., & Hosta-Rigau, L. (2018). Recent and prominent examples of nano- and microarchitectures as hemoglobin-based oxygen carriers. *Advances in colloid and interface science*, 260, 65–84. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.08.006>
- Jia, Y., Ramasamy, S., Wood, F., Alayash, A. I., & Rifkind, J. M. (2004). Cross-linking with O-raffinose lowers oxygen affinity and stabilizes haemoglobin in a non-cooperative T-state conformation. *The Biochemical journal*, 384(Pt 2), 367–375. <https://doi.org/10.1042/BJ20040612>
- Kakaei, N., Amirian, R., Azadi, M., Mohammadi, G., & Izadi, Z. (2023). Perfluorocarbons: A perspective of theranostic applications and challenges. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 11, 1115254. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1115254>
- Khan, F., Singh, K., & Friedman, M. T. (2020). Artificial Blood: The History and Current Perspectives of Blood Substitutes. *Discoveries (Craiova, Romania)*, 8(1), e104. <https://doi.org/10.15190/d.2020.1>
- Kim, H. W., & Greenburg, A. G. (2004). Artificial oxygen carriers as red blood cell substitutes: a selected review and current status. *Artificial organs*, 28(9), 813–828. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1594.2004.07345.x>
- Kozłowska, K., Wojta-Kempa, M. (2011). Wiedza i postawy studentów wrocławskich uczelni na temat krwiodawstwa [Knowledge and Attitudes Concerning the Blood Donation Among Students of Wrocław]. *Pielęgniarstwo i Zdrowie Publiczne*, 1(2), 121-128
- Kresie L. (2001). Artificial blood: an update on current red cell and platelet substitutes. *Proceedings (Baylor University. Medical Center)*, 14(2), 158–161. <https://doi.org/10.1080/08998280.2001.11927754>
- Lane T. A. (1995). Perfluorochemical-based artificial oxygen carrying red cell substitutes. *Transfusion science*, 16(1), 19–31. [https://doi.org/10.1016/0955-3886\(94\)00067-t](https://doi.org/10.1016/0955-3886(94)00067-t)
- Lang, M. E., Korecky, B., Anderson, P. J., & Biro, G. P. (1990). Stroma-free hemoglobin solutions prepared by crystallization and ultrafiltration methods; comparison of composition and coronary vasoconstrictor potency. *Advances in experimental medicine and biology*, 277, 225–236. [https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8181-5\\_28](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8181-5_28)
- Lantieri, L., Cholley, B., Lemogne, C., Guillemain, R., Ortonne, N., Grimbert, P., Thervet, E., & Lellouch, A. G. (2020). First human facial retransplantation: 30-month follow-up. *Lancet (London, England)*, 396(10264), 1758–1765. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)32438-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)32438-7)
- Latson G. W. (2019). Perftoran (Vidaphor)-Introduction to Western Medicine. *Shock (Augusta, Ga.)*, 52(1S Suppl. 1), 65–69. <https://doi.org/10.1097/SHK.0000000000001063>
- Le Gall, T., Polard, V., Rousselot, M., Lotte, A., Raouane, M., Lehn, P., Opolon, P., Leize, E., Deutsch, E., Zal, F., & Montier, T. (2014). *In vivo* biodistribution and oxygenation potential of a new generation of oxygen carrier. *Journal of biotechnology*, 187, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2014.07.008>

- Le Meur, Y., Badet, L., Essig, M., Thierry, A., Büchler, M., Drouin, S., Deruelle, C., Morelon, E., Pesteil, F., Delpech, P. O., Boutin, J. M., Renard, F., & Barrou, B. (2020). First-in-human use of a marine oxygen carrier (M101) for organ preservation: A safety and proof-of-principle study. *American journal of transplantation: official journal of the American Society of Transplantation and the American Society of Transplant Surgeons*, 20(6), 1729–1738. <https://doi.org/10.1111/ajt.15798>
- Lemaire, F., Sigrist, S., Delpy, E., Cherfan, J., Peronet, C., Zal, F., Bouzakri, K., Pinget, M., & Maillard, E. (2019). Beneficial effects of the novel marine oxygen carrier M101 during cold preservation of rat and human pancreas. *Journal of cellular and molecular medicine*, 23(12), 8025–8034. <https://doi.org/10.1111/jcmm.14666>
- Li, S., Nickels, J., & Palmer, A. F. (2005). Liposome-encapsulated actin-hemoglobin (LEAcHb) artificial blood substitutes. *Biomaterials*, 26(17), 3759–3769. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.09.015>
- Lowe K. C. (1999). Perfluorinated blood substitutes and artificial oxygen carriers. *Blood reviews*, 13(3), 171–184. <https://doi.org/10.1054/blre.1999.0113>
- Lowe, K.C. (2006). Blood substitutes: from chemistry to clinic. *Journal of Materials Chemistry*, 16(43), 4189–4196
- Lupon, E., Lellouch, A. G., Zal, F., Cetrulo, C. L., Jr, & Lantieri, L. A. (2021). Combating hypoxemia in COVID-19 patients with a natural oxygen carrier, HEMO<sub>2</sub>Life® (M101). *Medical hypotheses*, 146, 110421. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2020.110421>
- Macciò, A., & Madeddu, C. (2012). Management of anemia of inflammation in the elderly. *Anemia*, 2012, 563251. <https://doi.org/10.1155/2012/563251>
- Makowicz, D., Dziubaszewska, R., Lisowicz, K., & Makowicz, N. (2022). Wpływ regularnego oddawania krwi na organizm ludzki w opinii krwiodawców. *Journal of Transfusion Medicine*, 15(2), 141-149
- Mallet, V., Dutheil, D., Polard, V., Rousselot, M., Leize, E., Hauet, T., Goujon, J. M., & Zal, F. (2014). Dose-ranging study of the performance of the natural oxygen transporter HEMO<sub>2</sub> Life in organ preservation. *Artificial organs*, 38(8), 691–701. <https://doi.org/10.1111/aor.12307>
- Mer, M., Hodgson, E., Wallis, L., Jacobson, B., Levien, L., Snyman, J., Sussman, M. J., James, M., van Gelder, A., Allgaier, R., & Jahr, J. S. (2016). Hemoglobin glutamer-250 (bovine) in South Africa: consensus usage guidelines from clinician experts who have treated patients. *Transfusion*, 56(10), 2631–2636. <https://doi.org/10.1111/trf.13726>
- Mohandas, N., & Gallagher, P. G. (2008). Red cell membrane: past, present, and future. *Blood*, 112(10), 3939–3948. <https://doi.org/10.1182/blood-2008-07-161166>
- Moon-Massat, P., Mullah, S. H., Abutarboush, R., Saha, B. K., Pappas, G., Haque, A., Aufer, C., McCarron, R. M., Arnaud, F., & Scultetus, A. (2017). Cerebral Vasoactivity and Oxygenation with Oxygen Carrier M101 in Rats. *Journal of neurotrauma*, 34(19), 2812–2822. <https://doi.org/10.1089/neu.2015.3908>
- Moradi, S., Jahanian-Najafabadi, A., & Roudkenar, M. H. (2016). Artificial Blood Substitutes: First Steps on the Long Route to Clinical Utility. *Clinical medicine insights. Blood disorders*, 9, 33–41. <https://doi.org/10.4137/CMBD.S38461>

- Mushlin, P. S., Boucek, R. J., Jr, Parrish, M. D., Graham, T. P., Jr, & Olson, R. D. (1985). Beneficial effects of perfluorochemical artificial blood on cardiac function following coronary occlusion. *Life sciences*, 36(22), 2093–2102. [https://doi.org/10.1016/0024-3205\(85\)90305-4](https://doi.org/10.1016/0024-3205(85)90305-4)
- Nelson, D., Azari, M., Brown, R., Burhop, K., Bush, S., Catarello, J., Chuang, H., Downing, C., Estep, T., & Loewen, A. (1992). Preparation and characterization of diaspirin cross-linked hemoglobin solutions for preclinical studies. *Biomaterials, artificial cells, and immobilization biotechnology: official journal of the International Society for Artificial Cells and Immobilization Biotechnology*, 20(2-4), 423–427. <https://doi.org/10.3109/10731199209119662>
- Niechwiadowicz-Czapka T., Klimczyk A. *Leczenie krwiq*. Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa, 2011, s. 81-96
- Nishimura, N., Nitsuno, T., Naito, R. (1981). Clinical studies of a perfluorochemical, whole blood substitute. *Critical Care Medicine*, 9(3), 168
- Osaro, E., & Charles, A. T. (2011). The challenges of meeting the blood transfusion requirements in Sub-Saharan Africa: the need for the development of alternatives to allogenic blood. *Journal of blood medicine*, 2, 7–21. <https://doi.org/10.2147/JBM.S17194>
- Patton, J. N., & Palmer, A. F. (2005). Photopolymerization of bovine hemoglobin entrapped nanoscale hydrogel particles within liposomal reactors for use as an artificial blood substitute. *Biomacromolecules*, 6(1), 414–424. <https://doi.org/10.1021/bm049432i>
- Pidcoke, H. F., Delacruz, W., Herzig, M. C., Schaffer, B. S., Leazer, S. T., Fedyk, C. G., Montgomery, R. K., Prat, N. J., Parida, B. K., Aden, J. K., Scherer, M. R., Reddick, R. L., Shade, R. E., & Cap, A. P. (2022). Perfluorocarbons cause thrombocytopenia, changes in RBC morphology and death in a baboon model of systemic inflammation. *PLoS one*, 17(12), e0279694. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0279694>
- Prempeh, A.B.A., & Cheng, D.C.H. (2022). O-Raffinose Cross-Linked Human Hemoglobin (Hemolink): History, Clinical Trials and Lessons Learned. In: Liu H., Kaye A.D., Jahr J.S., editors. *Blood Substitutes and Oxygen Biotherapeutics*. Springer; Cham, Switzerland: 2022. pp. 305–312
- Priavalle, C., & De Angelo, J. (2022). Hemoximer: History, Pharmacology, Pre-Clinical Studies, Clinical Trials, and Lessons Learned. In: Liu H., Kaye A.D., Jahr J.S., editors. *Blood Substitutes and Oxygen Biotherapeutics*. Springer
- Rameez, S., Alost, H., & Palmer, A. F. (2008). Biocompatible and biodegradable polymersome encapsulated hemoglobin: a potential oxygen carrier. *Bioconjugate chemistry*, 19(5), 1025–1032. <https://doi.org/10.1021/bc700465v>
- Rhodes CE, Denault D, Varacallo M. Physiology, Oxygen Transport. [Updated 2022 Nov 14]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK538336/>
- Riess J. G. (2005). Understanding the fundamentals of perfluorocarbons and perfluorocarbon emulsions relevant to *in vivo* oxygen delivery. *Artificial cells, blood substitutes, and immobilization biotechnology*, 33(1), 47–63. <https://doi.org/10.1081/bio-200046659>
- Riess J. G. (2006). Perfluorocarbon-based oxygen delivery. *Artificial cells, blood substitutes, and immobilization biotechnology*, 34(6), 567–580. <https://doi.org/10.1080/10731190600973824>



Romito, B., Romito, J., & Abuchowski, A. (2022). Blood Substitutes and Oxygen Biotherapeutics. Springer; Cham, Switzerland: 2022. Sanguinate: History and Clinical Evaluation of a Multimodal HBOCs; pp. 335–343

Rousselot, M., Delpy, E., Drieu La Rochelle, C., Lagente, V., Pirow, R., Rees, J. F., Hagege, A., Le Guen, D., Hourdez, S., & Zal, F. (2006). *Arenicola marina* extracellular hemoglobin: a new promising blood substitute. *Biotechnology journal*, 1(3), 333–345. <https://doi.org/10.1002/biot.200500049>

Sakai, H., Horinouchi, H., Tomiyama, K., Ikeda, E., Takeoka, S., Kobayashi, K., & Tsuchida, E. (2001). Hemoglobin-vesicles as oxygen carriers: influence on phagocytic activity and histopathological changes in reticuloendothelial system. *The American journal of pathology*, 159(3), 1079–1088. [https://doi.org/10.1016/S0002-9440\(10\)61783-X](https://doi.org/10.1016/S0002-9440(10)61783-X)

Sakai, H., Kobayashi, N., Kure, T., Azuma, H. (2022). Potential Clinical Application of Hemoglobin Vesicles as an Artificial Oxygen Carrier and Carbon Monoxide Carrier. In: Liu H., Kaye A.D., Jahr J.S., editors. *Blood Substitutes and Oxygen Biotherapeutics*. Springer

Sakai, H., Sou, K., & Tsuchida, E. (2009). Hemoglobin-vesicles as an artificial oxygen carrier. *Methods in enzymology*, 465, 363–384. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(09\)65019-9](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(09)65019-9).

Sarkar S. (2008). Artificial blood. *Indian journal of critical care medicine: peer-reviewed, official publication of Indian Society of Critical Care Medicine*, 12(3), 140–144. <https://doi.org/10.4103/0972-5229.43685>

Scott, R. W., Wilson, O. M., & Crooks, R. M. (2005). Synthesis, characterization, and applications of dendrimer-encapsulated nanoparticles. *The journal of physical chemistry. B*, 109(2), 692–704. <https://doi.org/10.1021/jp0469665>

Seifried, E., & Mueller, M. M. (2011). The present and future of Transfusion Medicine. *Blood transfusion = Trasfusione del sangue*, 9(4), 371–376. <https://doi.org/10.2450/2011.0097-10>

Sen Gupta A. (2019). Hemoglobin-based Oxygen Carriers: Current State-of-the-art and Novel Molecules. *Shock (Augusta, Ga.)*, 52(1S Suppl. 1), 70–83. <https://doi.org/10.1097/SHK.0000000000001009>

Sharma, A., Arora, S., Grewal, P., Dhillon, V., Kumar, V. (2011). Recent innovations in delivery of artificial blood substitute: a review. *International Journal of Applied Pharmaceutics*, 3(2), 1–5

Sharma, S., Sharma, P., & Tyler, L. N. (2011). Transfusion of blood and blood products: indications and complications. *American family physician*, 83(6), 719–724

Sheng, Y., Yuan, Y., Liu, C., Tao, X., Shan, X., & Xu, F. (2009). *In vitro* macrophage uptake and *in vivo* biodistribution of PLA-PEG nanoparticles loaded with hemoglobin as blood substitutes: effect of PEG content. *Journal of materials science. Materials in medicine*, 20(9), 1881–1891. <https://doi.org/10.1007/s10856-009-3746-9>

Shi, Q., Huang, Y., Chen, X., Wu, M., Sun, J., & Jing, X. (2009). Hemoglobin conjugated micelles based on triblock biodegradable polymers as artificial oxygen carriers. *Biomaterials*, 30(28), 5077–5085. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.05.082>

Simoni, J., Simoni, G., & Moeller, J. F. (2009). Intrinsic toxicity of hemoglobin: how to counteract it. *Artificial organs*, 33(2), 100–109. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1594.2008.00693.x>

- Sloan, E. P., Koenigsberg, M., Gens, D., Cipolle, M., Runge, J., Mallory, M. N., & Rodman, G., Jr (1999). Diaspirin cross-linked hemoglobin (DCLHb) in the treatment of severe traumatic hemorrhagic shock: a randomized controlled efficacy trial. *JAMA*, 282(19), 1857–1864. <https://doi.org/10.1001/jama.282.19.1857>
- Smani Y. (2008). Hemospan: a hemoglobin-based oxygen carrier for potential use as a blood substitute and for the potential treatment of critical limb ischemia. *Current opinion in investigational drugs (London, England: 2000)*, 9(9), 1009–1019
- Sou, K., Klipper, R., Goins, B., Tsuchida, E., & Phillips, W. T. (2005). Circulation kinetics and organ distribution of Hb-vesicles developed as a red blood cell substitute. *The Journal of pharmacology and experimental therapeutics*, 312(2), 702–709. <https://doi.org/10.1124/jpet.104.074534>
- Sprung, J., Kindscher, J. D., Wahr, J. A., Levy, J. H., Monk, T. G., Moritz, M. W., & O'Hara, P. J. (2002). The use of bovine hemoglobin glutamer-250 (Hemopure) in surgical patients: results of a multicenter, randomized, single-blinded trial. *Anesthesia and analgesia*, 94(4). <https://doi.org/10.1097/0000539-200204000-00006>
- Stowell C. (2008). Blood substitutes: time for a deep breath. *Transfusion*, 48(4), 574–575. <https://doi.org/10.1111/j.1537-2995.2008.01675.x>
- Tam, S. C., Blumenstein, J., & Wong, J. T. (1976). Soluble dextran-hemoglobin complex as a potential blood substitute. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 73(6), 2128–2131. <https://doi.org/10.1073/pnas.73.6.2128>
- Tam, S. C., Blumenstein, J., & Wong, J. T. (1978). Blood replacement in dogs by dextran-hemoglobin. *Canadian journal of biochemistry*, 56(10), 981–984. <https://doi.org/10.1139/o78-153>
- Tao, Z., & Ghoroghchian, P. P. (2014). Microparticle, nanoparticle, and stem cell-based oxygen carriers as advanced blood substitutes. *Trends in biotechnology*, 32(9), 466–473. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2014.05.001>
- Tappenden J. (2007). Artificial blood substitutes. *Journal of the Royal Army Medical Corps*, 153(1), 3–9. <https://doi.org/10.1136/jramc-153-01-02>
- Thomas T.G. (1878). The intravenous injection of milk as a substitute for the transfusion of blood. *New York State Journal of Medicine*, 47, 449-465
- Thomson, A., Farmer, S., Hofmann, A., Isbister, J., & Shander, A. (2009). Patient blood management – a new paradigm for transfusion medicine? *ISBT science series*, 4(n2), 423–435. <https://doi.org/10.1111/j.1751-2824.2009.01251.x>
- Thuillier, R., Dutheil, D., Trieu, M. T., Mallet, V., Allain, G., Rousselot, M., Denizot, M., Goujon, J. M., Zal, F., & Hauet, T. (2011). Supplementation with a new therapeutic oxygen carrier reduces chronic fibrosis and organ dysfunction in kidney static preservation. *American journal of transplantation: official journal of the American Society of Transplantation and the American Society of Transplant Surgeons*, 11(9), 1845–1860. <https://doi.org/10.1111/j.1600-6143.2011.03614.x>
- Tsai, A. G., Intaglietta, M., Sakai, H., Delpy, E., La Rochelle, C. D., Rousselot, M., & Zal, F. (2012). Microcirculation and NO-CO studies of a natural extracellular hemoglobin developed for an oxygen therapeutic carrier. *Current drug discovery technologies*, 9(3), 166–172. <https://doi.org/10.2174/157016312802650814>



- Tsai, C. H., Fang, T. Y., Ho, N. T., & Ho, C. (2000). Novel recombinant hemoglobin, rHb (beta N108Q), with low oxygen affinity, high cooperativity, and stability against autoxidation. *Biochemistry*, 39(45), 13719–13729. <https://doi.org/10.1021/bi001116a>
- Twyman, L. J., & Ge, Y. (2006). Porphyrin cored hyperbranched polymers as heme protein models. *Chemical communications (Cambridge, England)*, (15), 1658–1660. <https://doi.org/10.1039/b600831n>
- Twyman, L. J., Ellis, A., & Gittins, P. J. (2012). Pyridine encapsulated hyperbranched polymers as mimetic models of haeme containing proteins, that also provide interesting and unusual porphyrin-ligand geometries. *Chemical communications (Cambridge, England)*, 48(1), 154–156. <https://doi.org/10.1039/c1cc14396d>
- Usuba, A., Motoki, R., Ogata, Y., Suzuki, K., & Kamitani, T. (1995). Effect and safety of liposome-encapsulated hemoglobin neo red cells (NRCs) as a perfusate for total cardiopulmonary bypass. *Artificial cells, blood substitutes, and immobilization biotechnology*, 23(3), 337–346. <https://doi.org/10.3109/10731199509117950>
- Varnado, C. L., Mollan, T. L., Birukou, I., Smith, B. J., Henderson, D. P., & Olson, J. S. (2013). Development of recombinant hemoglobin-based oxygen carriers. *Antioxidants & redox signaling*, 18(17), 2314–2328. <https://doi.org/10.1089/ars.2012.4917>
- Vincent, J. L., Privalle, C. T., Singer, M., Lorente, J. A., Boehm, E., Meier-Hellmann, A., Darius, H., Ferrer, R., Sirvent, J. M., Marx, G., & DeAngelo, J. (2015). Multicenter, randomized, placebo-controlled phase III study of pyridoxalated hemoglobin polyoxyethylene in distributive shock (PHOENIX). *Critical care medicine*, 43(1), 57–64. <https://doi.org/10.1097/CCM.0000000000000554>
- Waeterschoot, J., Gosselé, W., Lemež, Š., & Casadevall I Solvas, X. (2024). Artificial cells for *in vivo* biomedical applications through red blood cell biomimicry. *Nature communications*, 15(1), 2504. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46732-8>
- Warsaw-based project to develop artificial blood could deliver innovation on a global scale. [https://ec.europa.eu/regional\\_policy/en/projects/Poland/warsaw-based-project-to-develop-artificial-blood-could-deliver-innovation-on-a-global-scale](https://ec.europa.eu/regional_policy/en/projects/Poland/warsaw-based-project-to-develop-artificial-blood-could-deliver-innovation-on-a-global-scale)
- Waters, J.H., Lim, J.C., Blanckenberg, J.M., & Jahr, J.S. (2022). Blood Substitutes and Oxygen Biotherapeutics. Springer; Cham, Switzerland: 2022. HBOC-201: History, Clinical Trials, and Path Forward; pp. 353–360
- Winslow R. M. (1995). Blood substitutes – a moving target. *Nature medicine*, 1(11), 1212–1215. <https://doi.org/10.1038/nm1195-1212>
- Winslow R. M. (2002). Blood substitutes. *Current opinion in hematology*, 9(2), 146–151. <https://doi.org/10.1097/00062752-200203000-00011>
- Winslow R.M. (1992). The results of 62 large-volume hemoglobin infusions in man. Hemoglobin-Based Red Cell Substitutes. Johns Hopkins University Press
- Winslow R.M. (2006a).  $\alpha$ -Crosslinked hemoglobin. In: Winslow R.M., editor. *Blood Substitutes*. Academic Press
- Winslow R.M. (2006b). Hemoglobin modification. In: Winslow R.M., editor. *Blood Substitutes*. Academic Press

Wollocko, H., Wollocko, J., Jahr, J.S., & Steier, K. (2022). OxyVita: History, Studies, and Future. In: Liu H., Kaye A.D., Jahr J.S., editors. *Blood Substitutes and Oxygen Biotherapeutics*. Springer

Xu, F., Yuan, Y., Shan, X., Liu, C., Tao, X., Sheng, Y., & Zhou, H. (2009). Long-circulation of hemoglobin-loaded polymeric nanoparticles as oxygen carriers with modulated surface charges. *International journal of pharmaceutics*, 377(1-2), 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2009.05.015>

Xu, Y., Zheng, Y., Fan, J. S., & Yang, D. (2006). A new strategy for structure determination of large proteins in solution without deuteration. *Nature methods*, 3(11), 931–937. <https://doi.org/10.1038/nmeth938>

Yu, B., Bloch, K. D., & Zapol, W. M. (2009). Hemoglobin-based red blood cell substitutes and nitric oxide. *Trends in cardiovascular medicine*, 19(3), 103–107. <https://doi.org/10.1016/j.tcm.2009.06.004>

Zal, F., Delpy, E., Jahr, J.S. (2022). M101, the Hemoglobin from the Sea: History and Therapeutic Perspectives. In: Liu H., Kaye A.D., Jahr J.S., editors. *Blood Substitutes and Oxygen Biotherapeutics*. Springer

Zhang, X., Lin, Y., Xin, J., Zhang, Y., Yang, K., Luo, Y., & Wang, B. (2024). Red blood cells in biology and translational medicine: natural vehicle inspires new biomedical applications. *Theranostics*, 14(1), 220–248. <https://doi.org/10.7150/thno.87425>

Zhu, K., Wang, L., Xiao, Y., Zhang, X., You, G., Chen, Y., Wang, Q., Zhao, L., Zhou, H., & Chen, G. (2024). Nanomaterial-related hemoglobin-based oxygen carriers, with emphasis on liposome and nano-capsules, for biomedical applications: current status and future perspectives. *Journal of nanobiotechnology*, 22(1), 336. <https://doi.org/10.1186/s12951-024-02606-1>

Малгожата Градюк, Галина Ткаченко, Наталія Кургалюк

## ВИКЛИКИ ТА МОЖЛИВОСТІ ШТУЧНОЇ КРОВІ

### АНОТАЦІЯ

**Мета дослідження:** Метою цього дослідження є представлення сучасного стану наукових досліджень щодо штучної крові, її потенційних клінічних застосувань і майбутніх напрямків розвитку. Проблема нестачі донорської крові в банках крові та зростаючий попит на переливання становлять значний виклик для сучасної медицини. У зв'язку з цим вчені по всьому світу намагаються розробити ефективні замітники крові, які могли б виконувати функцію перенесення кисню в організмі та зменшити залежність від традиційних донорів. У роботі розглянуто різні стратегії синтезу штучної крові, з урахуванням досягнень у галузі біотехнологій, біомедичної інженерії та нанотехнологій. Особливу увагу приділено дослідженням носіїв гемоглобіну та синтетичних еритроцитів.

**Методологія.** Для отримання достовірної та комплексної інформації щодо розвитку заміників крові було проведено аналіз наукової літератури, що включав бази даних, такі як PubMed, Scopus, Web of Science та Google Scholar. Досліджувані джерела охоплювали наукові статті, звіти про клінічні випробування, систематичні огляди та повідомлення про новітні технології в галузі біомедичної інженерії. У роботі розглянуто різні типи заміників еритроцитів, зосереджуючись на гемоглобіні, отриманому з різних джерел (наприклад, рекомбінантний гемоглобін, гемоглобін безхребетних), синтетичних мікрочастинках, що імітують еритроцити, та сучасних носіях кисню. Особливу увагу приділено результатам клінічних досліджень, які містять інформацію про безпеку, ефективність і можливі обмеження цих технологій.

**Наукова новизна.** Ця стаття робить важливий внесок у розвиток знань про штучну кров, представляючи погляд на її потенціал та виклики, пов'язані з клінічним застосуванням. Висвітлено ключові питання, такі як ефективність заміників крові у порівнянні з натуральною людською кров'ю, їх біодоступність, стабільність та можливі побічні ефекти. Крім того, звернуто увагу на витрати на виробництво та рівень прийняття таких продуктів медичною спільнотою та пацієнтами. У роботі також підкреслено необхідність подальших досліджень і розробки інноваційних технологій, які можуть сприяти підвищенню доступності та безпеки штучної крові. Розглянуто можливі напрямки майбутніх досліджень, зокрема застосування нанотехнологій, біоінженерії та біоматеріалів для створення більш ефективних і безпечних заміників крові.

**Висновки.** Розвиток штучних заміників еритроцитів може стати проривом у невідкладній медицині та в ситуаціях, коли традиційні переливання крові є неможливими або ускладненими (наприклад, у бойових умовах, під час стихійних лих, у регіонах із обмеженим доступом до донорської крові). Незважаючи на багаторічні дослідження та технологічний прогрес, багато заміників крові стикаються з труднощами, пов'язаними з обмеженою стабільністю, потенційною токсичністю та здатністю ефективно транспортувати кисень. Існуючі продукти, що пройшли клінічні випробування, демонструють перспективні властивості, проте вони все ще далекі від повного заміщення натуральної крові. Результати досліджень свідчать про те, що подальша робота над удосконаленням штучної крові має зосереджуватися на підвищенні безпеки, збільшенні терміну зберігання та оптимізації витрат на виробництво. Перспективи у цій сфері є багатообіцяючими, а майбутні досягнення можуть докорінно змінити підходи до лікування пацієнтів, які потребують переливання крові, і сприяти покращенню доступу до медичної допомоги у всьому світі.

**Ключові слова:** штучна кров, кровозамінники, клінічне застосування, носії гемоглобіну, кисневі терапевтичні засоби, перфторвуглеці, носії кисню на основі гемоглобіну

**Received:** 11.02.2025. **Accepted:** 02.03.2025. **Published:** 03.04.2025.

**Ви можете цитувати цю статтю так:**

Gradziuk M., Tkaczenko H., Kurhaluk N. Wyzwania i możliwości w tworzeniu sztucznej krwi. *Biota. Human. Technology*. 2025. №1. S. 59-93.

**Cite this article in APA style as:**

Gradziuk, M., Tkaczenko, H., & Kurhaluk, N. (2025). Challenges and opportunities in artificial blood. *Biota. Human. Technology*, 1, P. 59-93. (in Polish)

#### **Information about the authors:**

**Gradziuk M.** [*in Ukrainian: Градюк М.*] <sup>1</sup>, Graduate Student, email: [gosiagra@op.pl](mailto:gosiagra@op.pl)  
ORCID: 0009-0008-7064-5214

Institute of Biology, Pomeranian University in Słupsk  
22B Arciszewskiego Street, Słupsk, 76-200, Poland

**Tkaczenko H.** [*in Ukrainian: Ткаченко Г.*] <sup>1</sup>, 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.*] <sup>5</sup>, 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

<sup>1</sup> Study design, data collection, manuscript preparation.

<sup>2</sup> Study design, data collection, manuscript preparation, funds collection.

<sup>3</sup> Study design, data collection, manuscript preparation, funds collection.



Copyright (c) 2025 Halina Tkaczenko, Tetiana Tiupova, Valentyna Movchan, Oleksandr Lukash, 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/).

Галина Ткаченко, Тетяна Тюпова, Валентина Мовчан,  
Олександр Лукаш, Наталія Кургалюк

## ФІТОТЕРАПЕВТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ІМБИРУ (*ZINGIBER OFFICINALE*)



Halina Tkaczenko, Tetiana Tiupova, Valentyna Movchan,  
Oleksandr Lukash, Natalia Kurhaluk

## PHYTOTHERAPEUTIC USE OF GINGER (*ZINGIBER OFFICINALE*)

### АНОТАЦІЯ

Для багатьох людей імбир став не лише популярною пряністю в кулінарії, але й цінним додатком до здорового способу життя. Імбир містить численні біологічно активні сполуки, які надають йому різноманітні корисні властивості. Останні дослідження підтверджують його потенціал у боротьбі з різними захворюваннями та покращенні здоров'я. Його використання може допомогти підтримувати оптимальне функціонування організму та запобігати розвитку різних захворювань.

**Мета досліджень:** систематизація наукової інформації щодо терапевтичних властивостей імбиру у боротьбі з різними актуальними в наш час хворобами, такими як метаболічний синдром, цукровий діабет, ожиріння, серцево-судинні захворювання, неалкогольна жирова хвороба печінки і хронічна хвороба нирок. Ми проаналізували зібрану літературу з метою систематизації інформації про фармакологічні властивості імбиру, клінічні дослідження щодо його ефективності в різних умовах, механізми його дії, способи застосування та можливі побічні ефекти.

**Матеріали і методи досліджень.** Для підготовки огляду ми використовували наукову літературу, доступну в базах даних PubMed, Google Scholar, Scopus та інших академічних ресурсах. Ключовими словами для пошуку були «імбир», «*Zingiber officinale*», «фітотерапія», «фармакологічні властивості», «клінічні дослідження», «антиоксиданти», «протизапальні властивості». Ми включили до огляду статті, огляди, клінічні дослідження, метааналізи та систематичні огляди, які досліджували фітотерапевтичне застосування імбиру в різних аспектах здоров'я людини. Були враховані публікації, які були доступні на англійській мові та опубліковані в останні 25 років. Отримана інформація була систематизована, описана та проаналізована з метою підготовки оглядового матеріалу, який відображає сучасний стан досліджень з фітотерапевтичного застосування імбиру.

**Наукова новизна.** У статті проаналізовані останні наукові дослідження та клінічні випробування, які демонструють ефективність імбиру в лікуванні різних захворювань та підтримці здоров'я та включають нові відкриття щодо його механізмів дії, клінічні дослідження на людях та тваринах, а також метааналізи попередніх досліджень. У статті представлені механізми дії імбиру та його сполук, які пояснюють фармакологічну активність цієї рослини і включають вивчення його взаємодії з клітинами та органами організму, біохімічні реакції та сигнальні шляхи. Розглядаються також сучасні методи використання імбиру у фітотерапії та практиці здорового способу життя, зокрема у лікуванні метаболічного синдрому (ожиріння або надмірна вага, інсулінорезистентність, артеріальна гіпертензія, дисліпідемія).

**Висновки.** У статті оновлено та розширено наукові знання про фітотерапевтичне застосування імбиру, відкриття нових перспектив його використання та встановлення механізмів його дії. Імбир має значний потенціал як природний лікарський засіб завдяки своїм біологічно активним сполукам. Дослідження показують, що імбир проявляє різноманітні фармакологічні властивості, включаючи антиоксидантну, протизапальну, протипухлинну, боле- та жарознижувальну, антимікробну та імуномодулюючу дію. Дослідження підтверджують, що імбир може бути корисним у лікуванні та профілактиці різних захворювань, таких як ожиріння, цукровий діабет, серцево-судинні захворювання, метаболічний синдром, неалкогольна жирова хвороба печінки та хронічна хвороба нирок. Хоча наукові докази підтверджують ефективність імбиру у багатьох напрямках, є потреба в подальших клінічних дослідженнях, щоб підтвердити його ефективність, оптимальну дозування та потенційні побічні ефекти.

**Ключові слова:** імбир, *Zingiber officinale*, фітотерапія, цукровий діабет 2 типу, ожиріння, серцево-судинні захворювання, метаболічний синдром, неалкогольна жирова хвороба печінки та хронічна хвороба нирок

## ABSTRACT

For many people, ginger has become not only a popular spice in cooking, but also a valuable addition to a healthy lifestyle. Ginger contains many biologically active compounds that give it many beneficial properties. Recent studies confirm its potential in fighting various diseases and improving health. Its use can help maintain optimal body function and prevent the development of various diseases.

**Purpose:** The aim of this paper was to systematise scientific information on the therapeutic properties of ginger in the fight against various contemporary diseases, such as metabolic syndrome, diabetes, obesity, cardiovascular diseases, non-alcoholic fatty liver disease and chronic kidney disease. We analysed the collected literature to systematise information on the pharmacological properties of ginger, clinical trials on its efficacy in different conditions, mechanisms of action, methods of use and possible side effects.

**Materials and methods.** To prepare the review, we used scientific literature available in PubMed, Google Scholar, Scopus and other academic resources. The search terms were "inger", "*Zingiber officinale*", "phytotherapy", "pharmacological properties", "clinical trials", "antioxidants", "anti-inflammatory properties". The review included articles, reviews, clinical trials, meta-analyses and systematic reviews that investigated the phytotherapeutic use of ginger in various aspects of human health. Publications available in English and published in the last 25 years were included. The information obtained was systematised, described and analysed to produce a review material that reflects the current state of research on the phytotherapeutic use of ginger.

**Scientific novelty.** The article reviews the latest scientific research and clinical trials demonstrating the efficacy of ginger in the treatment of various diseases and health maintenance, including new discoveries about its mechanisms of action, clinical trials in humans and animals, and meta-analyses of previous studies. The article presents the mechanisms of action of ginger and its compounds, which explain the pharmacological activity of this plant and include the study of its interaction with cells and organs of the body, biochemical reactions and signalling pathways. Modern methods of using ginger in phytotherapy and in the practice of a healthy lifestyle are also considered, particularly in the treatment of metabolic syndrome (obesity or overweight, insulin resistance, hypertension, dyslipidaemia).

**Conclusions.** This article updates and expands the scientific knowledge on the phytotherapeutic use of ginger, opening new perspectives for its use and identifying its mechanisms of action. Ginger has significant potential as a natural medicine due to its biologically active compounds. Research shows that ginger has a variety of pharmacological properties, including antioxidant, anti-inflammatory, antitumour, antipyretic, antimicrobial and immunomodulatory effects. Research shows that ginger may be beneficial in the treatment and prevention of several diseases, including obesity, diabetes, cardiovascular disease, metabolic syndrome, non-alcoholic fatty liver disease and chronic kidney disease. Although scientific evidence supports the efficacy of ginger in many areas, further clinical trials are needed to confirm its efficacy, optimal dosage and potential side effects.

**Keywords:** ginger, *Zingiber officinale*, herbal medicine, type 2 diabetes, obesity, cardiovascular disease, metabolic syndrome, non-alcoholic fatty liver disease and chronic kidney disease

## Вступ

Імбир (*Zingiber officinale*) – це рослина, яка належить до родини Zingiberaceae (Ozkuş et al., 2022) та походить із Південно-Східної Азії. Ця родина відома своїми ароматними та пряними рослинами, які часто використовуються у кулінарії, медицині та інших галузях. Імбир широко використовується як пряний інгредієнт у різноманітних стравах, а також у народній медицині через його потенційні корисні властивості (Baptista et al., 2022). В останні роки імбир набув більшої популярності при профілактиці та лікуванні таких розладів як цукровий діабет, ожиріння, серцево-судинні захворювання. Дійсно, дослідження показали, що імбир має багато важливих властивостей. До них належать антиоксидантні (Ozkuş et al., 2022), болезаспокійливі, жарознижуючі (Lee et al., 2009), протизапальні (Venkateswaran et al., 2021), протипухлинні (Brahma Naidu et al., 2016), протимікробні (Sun et al., 2015), протидіабетичні (Bhandari et al., 2005),

протиалергічні та імуномодулюючі (Wang et al., 2013), гепатопротекторні та нефропротекторні властивості (Baptista et al., 2022), а також в лікуванні ожиріння (Pulbutr et al., 2011),

Метою цієї оглядової статті є систематизація наукової інформації щодо терапевтичних властивостей імбиру у боротьбі з різними актуальними в наш час хворобами, такими як метаболічний синдром, цукровий діабет, ожиріння, серцево-судинні захворювання, неалкогольна жирова хвороба печінки і хронічна хвороба нирок. Ми проаналізували зібрану літературу з метою систематизації інформації про фармакологічні властивості імбиру, клінічні дослідження щодо його ефективності в різних умовах, механізми його дії, способи застосування та можливі побічні ефекти.

## Матеріали і методи досліджень

Для підготовки огляду ми використовували наукову літературу, доступну в базах даних PubMed, Google Scholar, Scopus та



інших академічних ресурсах. Ключовими словами для пошуку були «імбир», «*Zingiber officinale*», «фітотерапія», «фармакологічні властивості», «клінічні дослідження», «антиоксиданти», «протизапальні властивості». Ми включили до огляду статті, огляди, клінічні дослідження, метааналізи та систематичні огляди, які досліджували фітотерапевтичне застосування імбиру в різних аспектах здоров'я людини. Були враховані публікації, які були доступні на англійській мові та опубліковані в останні 25 років. Отримана інформація була систематизована, описана та проаналізована з метою підготовки оглядового матеріалу, який відображає сучасний стан досліджень з фітотерапевтичного застосування імбиру.

### Історія використання імбиру

Імбир (*Z. officinale* Roscoe) належить до родини Zingiberaceae, і тривалий час використовується в кулінарних рецептах як пряність завдяки його сильному освіжаючому і гострому аромату (Semwal et al., 2015). Історія застосування імбиру недостатньо вивчена, хоча рослина має довгу історію використання. Записи показують, що рослину культивували протягом багатьох десятиліть у тропічній Азії, швидше за все,

на півдні Китаю та Індії. Імбир був відомий і широко знаний греками, які використовували його, загортаючи в хліб, щоб запобігти нудоті після оргії. Імбир почав поширюватися по всьому світу в 13 столітті, коли Марко Поло відвідав Китай і Суматру і представив рослину в Європі. Крім того, араби привезли траву з Індії до Східної Африки, а потім почали привертати увагу інших народів до її властивостей. Імбир – комерційна культура, яка культивується в Африці, Латинській Америці та Південно-Східній Азії. У 1807 році англійський ботанік Вільям Роско дав рослині назву «*Z. officinale*», «*zingiberis*» – грецьке слово, що походить від санскритського слова «*shringavera*», що означає «у формі рогів оленя», тоді як «*officinale*» означає, що ця трава має лікувальні властивості (Baptista et al., 2022).

Рід *Zingiber* є третім за величиною з родини Zingiberaceae, представники якого переважно є їстівними та лікарськими рослинами (Wu i Liao, 1995) (рис. 1). Вона включає 141 вид, з яких 12 видів є місцевими для Китаю (Tan et al., 2018).

В таблиці 1 зібрані основні види роду *Zingiber* та їх використання у різних країнах.



Рис. 1. Корінь та квітка імбиру *Zingiber officinale*  
(<https://www.rbc.ua/>)



Використання видів роду *Zingiber* у різних країнах

Вид	Використання	Країна	Використана література
1	2	3	4
<i>Zingiber officinale</i>	Лікування застуди, кашлю, блювоти, діареї та болю в животі	Китай	Xiang et al., 2017
<i>Zingiber officinale</i>	Лікування астми, бронхіту, набряків, відрижки, запорів, асцити та полегшення метеоризму	Індія	Ali et al., 2008; Banihani, 2018
<i>Zingiber zerumbet</i>	Лікування болю в суглобах, болю в животі, застуди та дисменореї	Китай	Xiang et al., 2017
<i>Zingiber zerumbet</i>	Лікування сильного болю	Індія	Yob et al., 2011
<i>Zingiber zerumbet</i>	Засіб проти метеоризму	Таїланд	Yob et al., 2011
<i>Zingiber zerumbet</i>	Лікування головного болю, зубного болю, стригучого лишая, артралгії, розтягнень і болю в животі	Гаваї	Yob et al., 2011
<i>Zingiber striolatum</i>	Лікування діабету і запорів	Китай	Xiang et al., 2017
<i>Zingiber corallinum</i>	Широко використовується в парфумерній та косметичній промисловості	Китай	Hamid et al., 2018
<i>Zingiber mioga</i>	Лікування запалення, ревматичних розладів і шлунково-кишкового дискомфорту	Китай	Shin et al., 2015
<i>Zingiber mioga</i>	Використовується як прянощі в процесі соління та харчові добавки	Китай	Kim et al., 2016; Kim & Kang, 2017
<i>Zingiber mioga</i>	Для загортання та консервування манджю – традиційного японського кондитерського виробу	Японія	Lee et al., 2016

## Фітохімічний склад і фармакологічні властивості імбиру

Свіжі кореневища імбиру містять вуглеводи (60-70 %), воду (9-12 %), білки (9 %), золу (8 %), сиру клітковину (3-8 %), жирну олію (3-6 %), і летку олію (2-3 %). Імбир також містить мінерали (мг/100 г), такі як кальцій, калій і залізо (2,6), а також вітаміни, такі як тіамін (0,06), рибофлавін (0,03), ніацин (0,6) і аскорбінову кислоту (6,0). Біологічно активні сполуки, знайдені в імбирові, включають гінгероли (GN), зінгіберени та шогаоли (SG). GN – це група летючих фенольних сполук, які надають гострого смаку свіжим кореневищам. Ця група включає 4-, 6-, 8-, 10- і 12-GN, але найпоширенішою сполукою, що відповідає за гостроту, є 6-GN (Butt і Sultan, 2011).

Гінгероли є термічно лабільними, тому при високих температурах перетворюються на шогаоли (SG), які надають імбиру гострий і пряно-солодкий аромат. Необхідно підкрес-

лити, що багато факторів можуть суттєво впливати на якість та ефективність компонентів імбиру, включаючи умови зберігання та обробки (вирощування, збір і метод сушіння), а також варіння та приготування на пару (Baliga et al., 2011; Baptista et al., 2022).

Імбир можна споживати у формі обробленої їжі через його високоцінні олійні смоли та леткі олії, з яких олійні смоли складають 20-30 % леткої олії, 10 % нелеткої олії та 50-70 % пікантної смолистої речовини (Gao et al., 2021). Метаболіти імбиру (такі як 6-, 8-, 10-GN і 6-SG) вважаються безпечними для здорових людей у дозах до 2000 мг (Zick et al., 2008). Деякі побічні ефекти можуть бути викликані прийомом високих доз, проявляючись незначними шлунково-кишковими розладами, включаючи відрижку, печію та розлад травлення (Semwal et al., 2015). Після перетравлення метаболіти потрапляють у кишково-печінкову рециркуляцію. Усі фенольні сполуки утворюють глюкуронідні

та сульфатні кон'югати в різних органах, таких як печінка та кишечник, і циркулюють у кровотоці (Mukkavilli et al., 2018). Завдяки високій молекулярній масі та високій полярності глюкуронідів, домінує глюкуронізація, а не сульфатування (Zhang et al., 2021). У тканинах ці кон'югати стають вільними через дію ферменту  $\beta$ -глюкуронідази (Mukkavilli et al., 2018). Ниркова екскреція може не сприяти виведенню 6-гінгеролу з плазми, хоча дослідження показують, що він частково виводиться печінкою, коли печінкова токсичність сприяє підвищенню концентрації в плазмі (Ali et al., 2008). У харчовій промисловості зінгібаїн з імбиру (протеолітичний фермент, що належить до сімейства пептидаз цистеїнових протеаз) зазвичай використовується для розм'якшення жорсткого м'яса (Butt і Sultan, 2011).

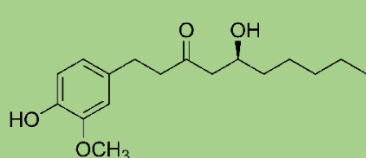
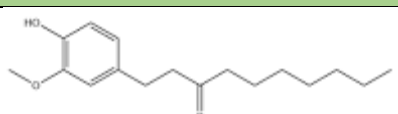
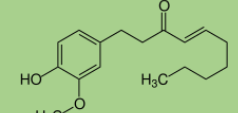
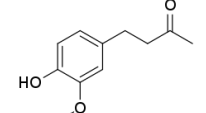
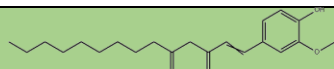
З точки зору біологічних ефектів, сполуки імбиру (включаючи гінгероли, зінгерон, зерумбон, шогаоли) беруть участь в апоптозі, клітинному циклі/пошкодженні ДНК, хроматиновій/епігенетичній регуляції, цитоскелетній регуляції та запаленні (Kiyama, 2020). Гінгероли пригнічують фізіологічні реакції, такі як шляхи фосфоїнозитид-3-кінази (PI3K)/Akt або Toll-подібні

рецептори, і пригнічують імунну відповідь під час активації T- і B-клітин. Крім того, він може бути ефективним для збільшення швидкості роботи мозку, а також корисний в лікуванні нейродегенеративних захворювань. Це пов'язано з клітинним метаболізмом і сигнальними шляхами, такими як аденозинмонофосфатзалежна протеїнкіназа (AMPK), сигналізація інсуліноподібного фактора росту 1 (IGF-1) та інсуліну (Kiyama, 2020). Імбир може збільшити фосфорилування AMPK, що пояснює вплив імбиру на метаболізм жирних кислот (Hashem et al., 2017). Посилення термогенезу також відбувається завдяки імбиру, в якому дія вивільнення катехоламінів впливає на  $\beta$ -адренергічні рецептори, активуючи симпатичну нервову систему та підвищуючи експресію білка роз'єднання 1 (UCP-1) і термогенез (Sugimoto et al., 2018).

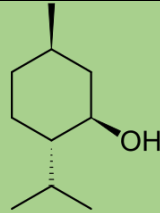
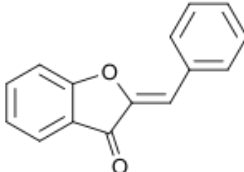
Загалом із роду *Zingiber* було виділено та ідентифіковано 447 сполук, які можна розділити на сім категорій, включаючи леткі масла, аналоги терпеноїдів, флавоноїди, аналоги гінгеролу, діарилгептаноїди, органічні кислоти та стериди (Deng et al., 2022). Ці сполуки та їхні властивості підсумовано в таблиці 2.

Таблиця 2

Фітохімічний склад рослин з роду *Zingiber*

Активні речовини	Властивості	Формула
1	2	3
Гінгерол	Антиоксидантна активність, протипухлинна активність шляхом індукції апоптозу та модуляції генетичної активності, протизапальна та антианальгетична активність, антимікробна активність та гепатопротекторна активність	
Парадол	Антиоксидантні, протиракові та антимікробні властивості	
Шогаол	Антиоксидантна, протизапальна, протиракова активність	
Зінгерон	Антиоксидантна активність, протизапальні та антибактеріальні властивості	
1-дегідро-10-гінгердіол	Регуляція експресії генів відповідальних за процеси запалення	

Продовження табл. 2

1	2	3
Терпеноїди	Індукція апоптозу через активацію p53	
Флавоноїди	Антиоксидантна активність	

### Імбір в профілактиці хвороб

Імбир використовувався в китайській та аюрведичній медицині протягом тисячоліть завдяки його протизапальним і антиоксидантним властивостям. Ці властивості приписують біологічно активним сполукам, таким як шогаол, парадол, зінгерон і, головним чином, гінгерол ([6]-гінгерол), які містяться у великих кількостях у свіжому імбирі (Parham et al., 2020). Aeschbach et al. (1994) вперше описали, що антиоксидантна активність імбиру та його аналогів може бути зумовлена здатністю пригнічувати перекисне окиснення фосфоліпідних ліпосом (маленьких везикул, утворених ліпідами) у присутності  $Fe^{3+}$  та аскорбату, що по суті елімінує вільні радикали трихлорметилперокси (Aeschbach et al., 1994). Ipproushi et al. (2003) показали, що [6]-гінгерол є потужним інгібітором оксиду азоту (NO), індукцйбельної синтази оксиду азоту (iNOS) і синтезу активних форм азоту (NOS), пов'язаного з окисним пошкодженням ДНК і канцерогенезом. Механізм, запропонований цими авторами, включає інгібування білка-активатора-1 (AP-1), фактора транскрипції, який бере участь у модуляції генів, які кодують NO та iNOS (Ipproushi et al., 2003). Нещодавно Fathi et al. (2021) з'ясували, що імбир може посилити експресію Nrf2, головного фактора ендогенного захисту, через реакцію між залишками цистеїну Keap-1 (репресор Nrf2) і фітохімічними речовинами, присутніми в імбирі (Fathi et al., 2021). Ця реакція змінює конформацію комплексу Nrf2-Keap1-Cul3, дозволяючи Nrf2 транслокуватися до ядра та взаємодіяти з елементом антиоксидантної відпо-

віді (ARE), таким чином активуючи каскад ферментів детоксикації та антиоксидантів (Duan et al., 2021; Fathi et al., 2021) (рис. 2). Імбир також послаблює запалення безпосередньо шляхом інгібування прозапальних лімфокінів (прозапальних цитокінів, які продукуються макрофагами) і опосередковано шляхом зменшення продукції NOS і активних форм кисню (ROS) (Tripathi et al., 2007).

NF- $\kappa$ B є добре відомим фактором транскрипції, який регулює гени, залучені в каскад запальних реакцій (Giuliani et al., 2001). Імбир може ефективно пригнічувати сигнальний шлях NF- $\kappa$ B і залучені гени, перехоплюючи активацію сигналів через I каппа B кіназу IKK (Lee et al., 2012). Це було підтверджено деградацією I $\kappa$ B $\alpha$  та транслокацією до ядра субодиниці NF- $\kappa$ B p65 і зниженням синтезу запальних цитокінів (Kim et al., 2018). Підтверджуючи ці висновки, Lee et al. (2009) виявили, що шляхом пригнічення активації NF- $\kappa$ B в ядрі, фосфорилування I $\kappa$ B $\alpha$  та транслокації p65 (транскрипційних факторів, які беруть участь у запальному процесі), імбир послаблює синтез iNOS та експресію TNF- $\alpha$ , таким чином, проявляючи антизапальну активність (Lee et al., 2009). Недавні дослідження *in vitro* підтверджують антиоксидантну роль імбиру (Venkateswaran et al., 2021). Дослідження на тваринах і людях підтвердили, що імбир має істотні антиоксидантні та протизапальні властивості, демонструючи зниження продукції запальних цитокінів, активацію NF- $\kappa$ B і підвищену активацію мРНК Nrf2, пов'язану зі збільшенням синтезу антиоксидантів після включення імбиру (Tung et al., 2017).

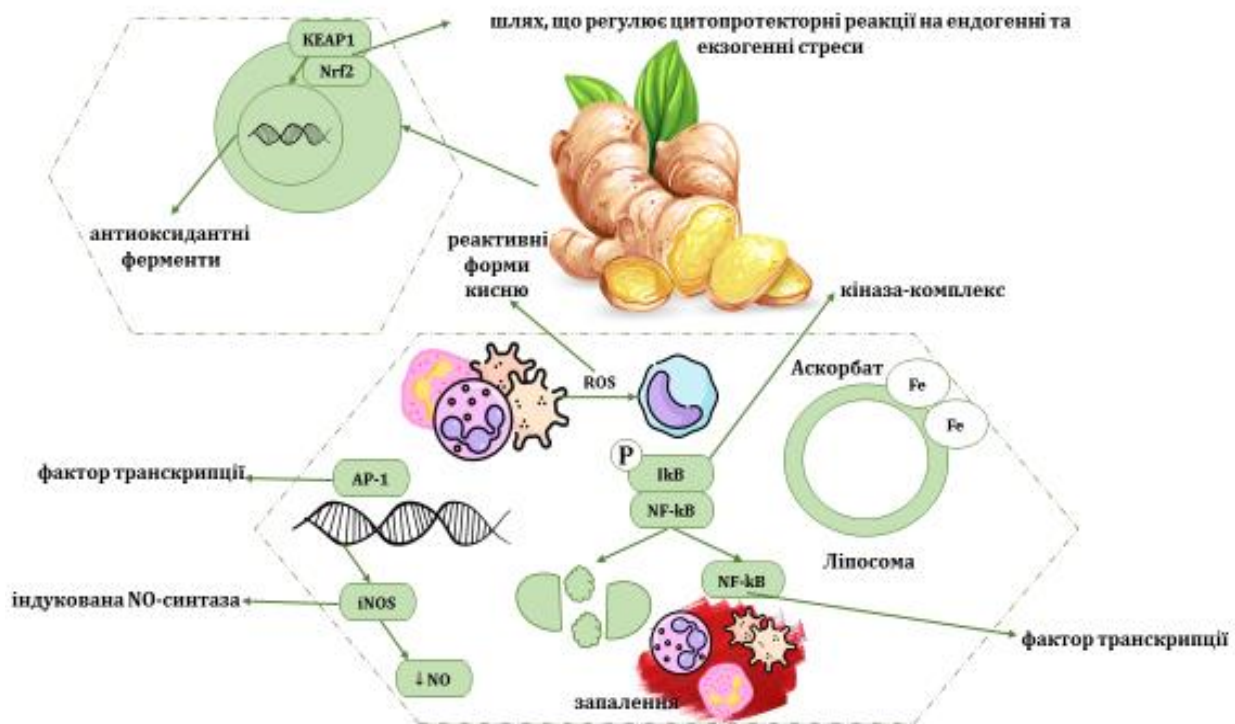


Рис. 2. Антиоксидантні та протизапальні властивості імбиру (за Vaprista et al., 2022)

У своєму дослідженні Jo et al. (2016) виявили, що поліфеноли, флавоноїди, гінгероли та ефірні олії, отримані з рослин роду *Zingiber*, продемонстрували значну антиоксидантну активність. Етанольний екстракт *Z. mioga*, порівняно з водним екстрактом, продемонстрував сильнішу антиоксидантну активність, пов'язану з поглинанням пероксильних радикалів (0,53/ТЕ 1 мкМ) із значенням ( $2697,31 \pm 118,25$  мг/100 г) загальної антиоксидантної здатності (ТАС) (Jo et al., 2016). Sun і ін (2015) підтвердили захисну дію етилацетатного екстракту *Z. zerumbet* у дозі 400 мг/кг в моделі індукованого етанолом пошкодження мозку завдяки своїм антиоксидантним властивостям (Sun et al., 2015). Антиоксидантну здатність метанольного екстракту *Z. officinale* оцінювали Murugesan et al. (2020) за допомогою аналізу з 2,2-дифеніло-1-пікрилогідразилом DPPH ( $86,26 \pm 0,97\%$ ), з діамоній 2,2'-азинобіс[3-етил-2,3-дигідробензотіазол-6-сульфонатом] ABTS ( $91,04 \pm 0,96\%$ ) і оксидом азоту ( $86,72 \pm 1,51\%$ ) (Murugesan et al., 2020).

Зерумбон, компонент імбирної ефірної олії, продемонстрував значну антиоксидантну дію зі значенням ( $58,3 \pm 2,08$ ) в методі FRAP (*Ferric-reducing antioxidant power*), що вище, ніж у аскорбінової кислоти, завдяки поси-

ленню клітинних антиоксидантних шляхів (Shin et al., 2019). Крім того, деякі аналоги гінгеролу проявляють помітну антиоксидантну активність. 6-гінгерол, 8-гінгерол, 10-гінгерол і 6-шогаол продемонстрували антиоксидантну дію з діапазоном значення  $IC_{50}$  від 8,05 до 26,3 мкМ відносно радикала DPPH. 10-гінгерол демонструє сильнішу здатність гальмувати радикали DPPH, ніж куркумін, але меншу здатність, ніж кверцетин. Найвищу антиоксидантну активність 6-шогаолу можна пояснити наявністю ненасичених кетонів. Групи замісників і довжина алкільного ланцюга відіграють вирішальну роль в антиоксидантних ефектах компонентів імбиру;  $\beta$ -ненасичений кетонівий фрагмент переважає над довжиною алкільних бічних ланцюгів у прояві антиоксидантних і протизапальних властивостей (Masuda et al., 2004; Dugasani et al., 2010).

Корінь імбиру, як правило, вважається безпечним. Норма споживання – це 4 грами на добу. При більш високих дозах існує ймовірність розвитку шлунково-кишкового дискомфорту, алергічних реакцій, тривалої кровотечі, пригнічення функцій центральної нервової системи та аритмії. Дослідження показали, що при споживанні понад 6 грамів коріння імбиру може посилити шлунково-



кишкові розлади, такі як шлунково-кишковий рефлюкс, печія та діарея. Це може спричинити токсичність варфарину та посилити його антикоагулянтні властивості, потенційно призводячи до кровотечі. Імбир може знижувати артеріальний тиск і, як було показано, викликати аритмію в невеликій кількості випадків. Збільшуючи секрецію жовчних кислот, імбир може

посилити утворення жовчних каменів (Ryan і Moggow, 2010).

Доведено, що екстракти імбиру та окремі його компоненти, виділені з рослинної сировини, виявляють протизапальні властивості. Завдяки ним рослина вважається корисною в лікуванні різних захворювань (рис. 3).

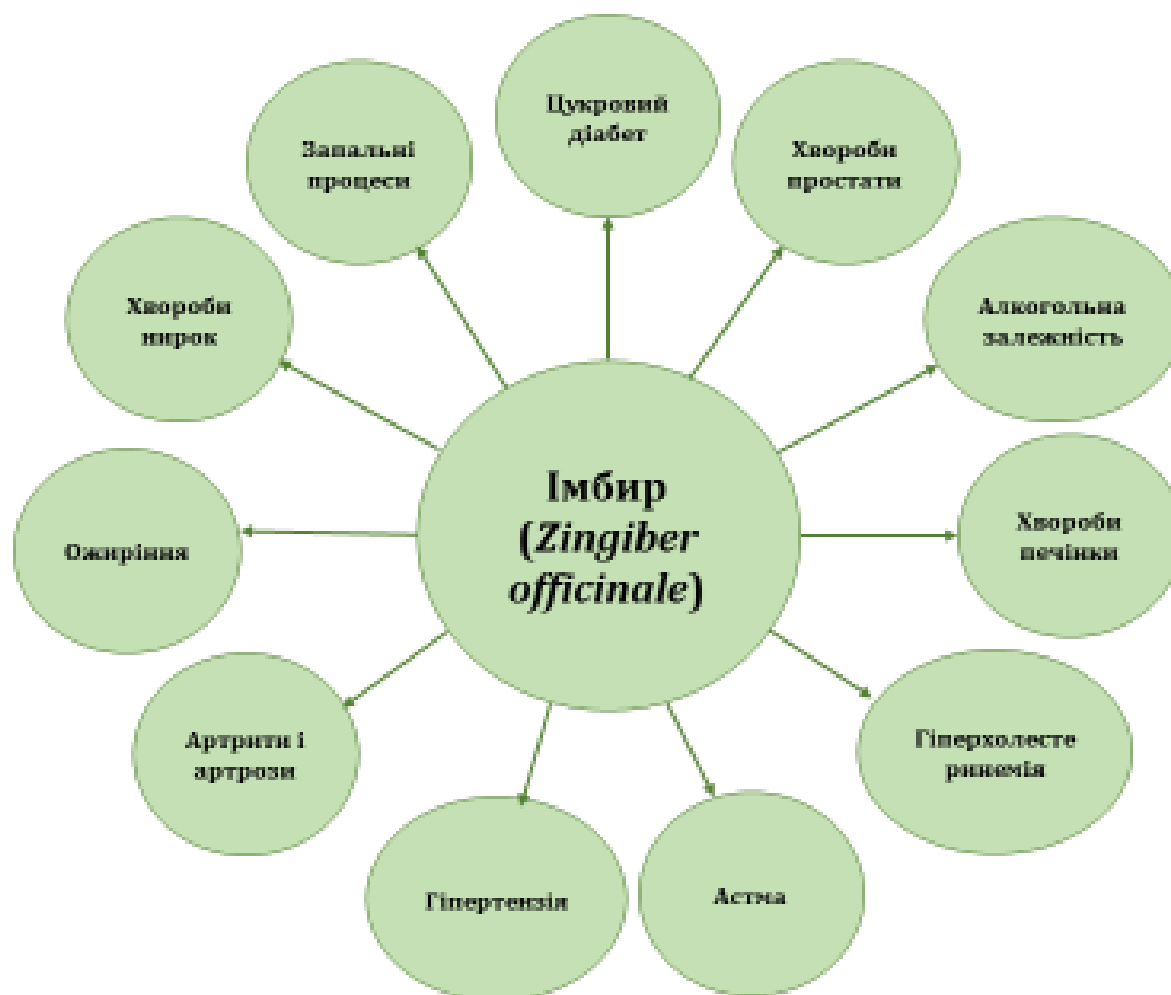


Рис. 3. Можливості терапевтичного використання імбиру (за Gumbarewicz et al., 2022)

### Профілактика і лікування метаболічного синдрому

Протягом багатьох років організації охорони здоров'я публікували різні визначення метаболічного синдрому (МС). Очевидно, що МС визначається сукупністю взаємопов'язаних фізіологічних, біохімічних, клінічних і метаболічних факторів, пов'язаних із підвищеним ризиком абдомінального ожиріння, гіперглікемії, дисліпідемії, запалення та гіпертензії, які підви-

щують ризик неалкогольної жирової хвороби печінки (НАЖХП), серцево-судинних захворювань (ССЗ) і діабету. Розсіяний склероз є важливою проблемою охорони здоров'я, яка набула масштабів пандемії, оскільки зараз вона вражає чверть населення світу (Lemieux і Després, 2020). Дедалі більше уваги приділяється пошуку ефективних стратегій для виявлення, лікування та контролю супутніх захворювань, пов'язаних із МС (Wang et al., 2017).



Метаболічний синдром – це складний розлад, який виникає внаслідок нездорового харчування та низької фізичної активності (Cornier et al., 2008), що є серйозною проблемою для охорони здоров'я в усьому світі та є помітним фактором ризику серцево-судинних захворювань (Alberti et al., 2005). Крім того, ожиріння (Després і Lemieux, 2006), дисліпідемія (Halpern et al., 2010), гіперглікемія (Fumeron et al., 2011), гіпертонія (Schillaci et al., 2004) та інсуліно-

резистентність (Mikhail, 2009) є найбільш прийнятними об'єднуючими ознаками, що пояснюють патофізіологію метаболічного синдрому. Метаболічний синдром – це комплекс симптомів, який включає різні метаболічні порушення і фактори ризику для серцево-судинних захворювань та цукрового діабету типу 2 (рис. 3).

Роль імбиру та його компонентів у розвитку метаболічного синдрому представлена на рис. 4.

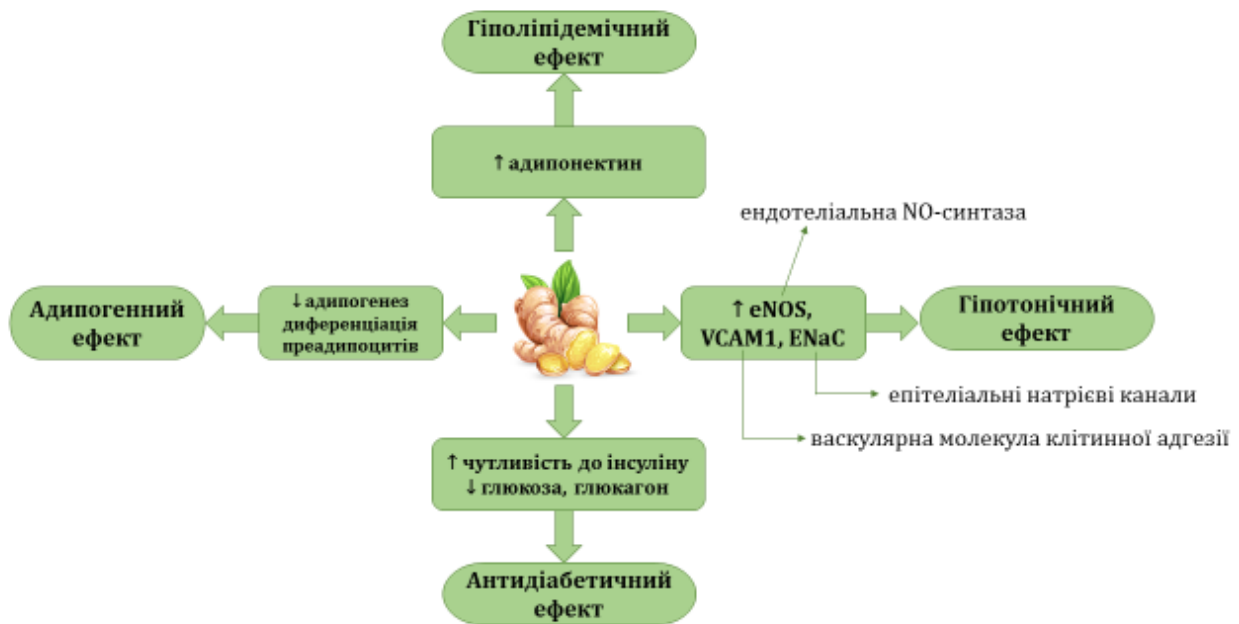


Рис. 4. Схематична дія імбиру та його активних компонентів при метаболічному синдромі (за Salaramoli et al., 2022)

### Профілактика цукрового діабету (ЦД)

В даний час є багатообіцяючі докази корисних властивостей екстракту імбиру, який є ефективним у зниженні рівня глюкози в крові (Bhandari et al., 2005). Як описано раніше, імбир у формі трав'яного екстракту був звичайною практикою в лікуванні ЦД з давніх часів (Li et al., 2012a). Були описані деякі механізми, щоб пояснити потенційний ефект імбиру в контролі ЦД, наприклад, інгібування ключових ферментів, пов'язаних з метаболізмом вуглеводів ( $\alpha$ -амілази та  $\alpha$ -глюкозидази) (Li et al., 2012b; Rani et al., 2011). На сьогодні низка досліджень продемонструвала, що екстракт імбиру може справляти істотний вплив на рівень глюкози в сироватці крові та вміст глікогену в тканинах на тваринних моделях діабету, викликаного алоксаном і стрептозотоцином, шляхом посилення периферичного викорис-

тання глюкози, регуляції активності гліколітичних ферментів і обмеження глюконеогенного утворення (Bhandari et al., 2005; Al-Amin et al., 2006; Kota et al., 2012; Kazeem et al., 2013). Екстракт імбиру може підвищити активність гліколітичних ферментів, які стимулюють метаболічну деградацію глюкози з утворенням пірувату (Abdulrazaq et al., 2012). Крім того, захисний вплив імбиру на розвиток діабету було досліджено на моделі щурів, яких годували кормами з високим вмістом жирів/вуглеводів (HFHC), і результати показали, що екстракт імбиру значно покращив чутливість до інсуліну за допомогою оцінки гомеостатичної моделі резистентності до інсуліну (Li et al., 2014).

Відповідно до результатів, отриманих Bhandari et al. (2005), дослідження впливу етанолового екстракту імбиру (200 мг/кг маси тіла) протягом 20 днів продемонстру-

вало значний антигіперглікемічний ефект у щурів з ЦД індукованим стрептозотоцином (STZ) (Bhandari et al., 2005). Водний екстракт імбиру (500 мг/кг маси тіла) значно знижував рівень глюкози в крові після лікування імбиром на 8-й день порівняно з вихідним рівнем у щурів з діабетом, індукованим алоксаном (Jafri et al., 2010). Однак нещодавно опубліковані дані досліджень на людях показали суперечливі результати щодо контролю рівня глюкози в крові (Huang et al., 2019). У дослідженні Karimi et al. (2015) споживання імбирної добавки (чотири капсули в дозі 3 г/день) протягом 7 тижнів суттєво не змінило рівень глюкози в крові ( $6,5 \pm 0,4$  ммоль/л) порівняно з групою плацебо ( $6,5 \pm 1$  ммоль/л) (Karimi et al., 2015). В іншому дослідженні споживання капсули на основі імбиного екстракту (1000 мг на день) протягом 10 тижнів значно знизило рівень глюкози в крові натще до 20% у групі дорослих без ЦД (Imani et al., 2015). І навпаки, дослідження Bordia et al. (1997) показало, що прийом 5 г імбирного порошку пацієнтами без ЦД протягом 3 місяців не вплинув на рівень глюкози в крові натще і після їжі (Bordia et al., 1997).

Глюкагоноподібний пептид 1 (GLP-1) є гормоном, що виділяється ендокринними клітинами в кишечнику, який відіграє вирішальну роль у стимуляції продукції інсуліну та пригніченні вивільнення глюкагону, запобігаючи зниженню роботи шлунку та зменшенню апетиту (Drucker і Nauck, 2006; Rameshrad et al., 2020). Досліджено, що рівні GLP-1 можна регулювати через вплив [6]-гінгеролу на вивільнення інсуліну. Механічно [6]-гінгерол посилює та активує циклічний аденозинмонофосфат (цАМФ), протеїнкіназу А (РКА) і білок, що зв'язує елемент відповіді цАМФ (CREB) в острівцях підшлункової залози, які є основними субстратами GLP-1-опосередкованого шляху секреції інсуліну. [6]-Гінгерол може посилювати експресію як Rab27a GTPase, так і Slp4-a в панкреатичних острівцях. Крім того, він покращує екзоцитоз секреторних гранул, що містять інсулін. [6]-Гінгерол збільшує накопичення глікогену в м'язах через активність глікогенсинтази 1 (GYS1). Існує багато транспортерів GLUT4 у мембрані скелетних міоцитів, що можна пояснити підвищенням експресії Rab8 і Rab10 GTPases, які відповідають за екзоцитоз GLUT4 до мембрани (рис. 5).

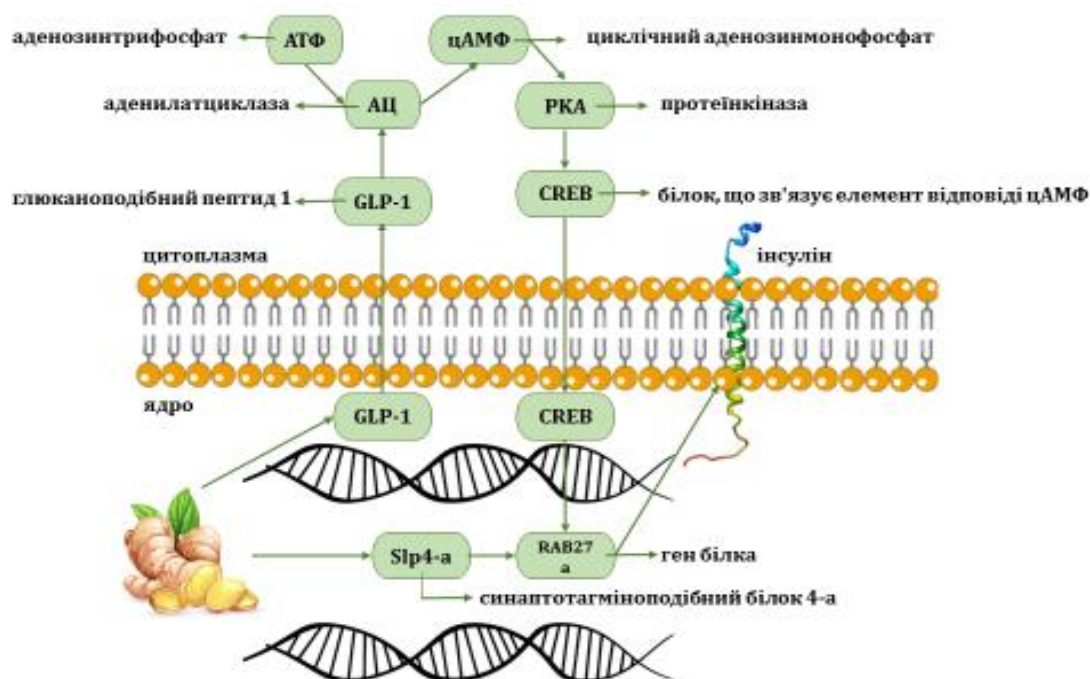


Рис. 5. Роль імбиру у вивільненні інсуліну (за Salaramoli et al., 2022)

Отже, GLP-1 регулюється інсуліно-тропною активністю [6]-гінгеролу. Він сприяє розподілу глюкози в скелетних м'язах, покращуючи активність GYS1 і

посилюючи представлення GLUT4s у клітинній мембрані (Samad et al., 2017). Вплив імбиру на споживання глюкози міоцитами показано на рис. 6.

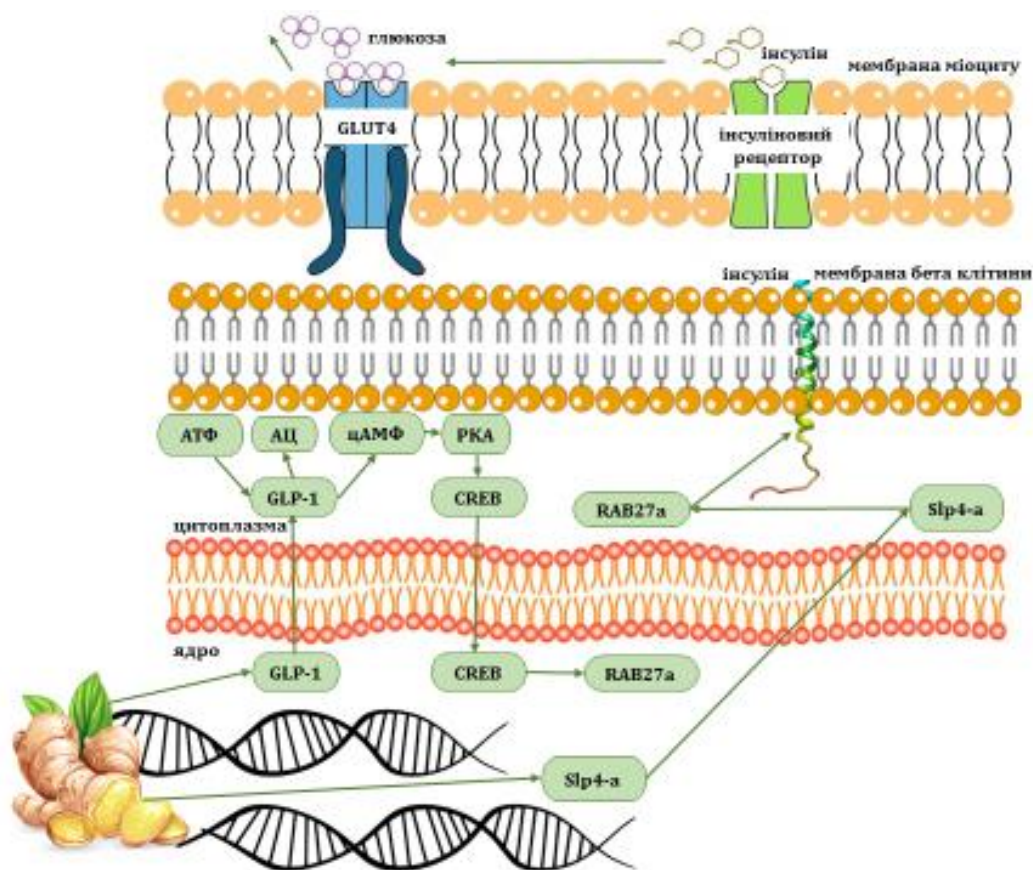


Рис. 6. Вплив імбиру на споживання глюкози скелетними м'язами (за Salaramoli et al., 2022)

Rani et al. (2011) досліджували *in vitro* (клітини C<sub>2</sub>C<sub>12</sub>) можливий інгібуючий ефект екстракту імбиру, розчиненого в гексані, етилацетаті, метанолі, 70% водних розчинах, на ферменти  $\alpha$ -амілазу та  $\alpha$ -глюкозидазу. Наприкінці дослідження вони помітили, що екстракт імбиру ефективно пригнічує ферменти та відіграє найбільш значну інгібаторну роль при розчиненні в етилацетаті, ніж в інших розчинах (Rani et al., 2011). Підтверджуючи ці висновки, автори також показали в іншому дослідженні, що екстракт імбиру, розчинений в етилацетаті, завдяки дії гінгеролів здатний збільшити поглинання глюкози клітинами скелетних м'язів щурів, збільшуючи транслокацію GLUT4 на поверхню плазматичної мембрани (Rani et al., 2012; Li et al., 2014). Імбир також може модулювати активність інсуліну у  $\beta$ -клітинах підшлункової залози та відновлювати рівень інсуліну в плазмі, як показали Chakraborty et al. (2012), оцінюючи вплив 6-гінгеролу на щурів з ЦД індукованих миш'яком. Наприкінці дослідження автори спостерігали зниження рівня глюкози в сироватці крові, підвищення експресії сироваткового інсуліну та GLUT4,

збільшення активності антиоксидантних ферментів (супероксиддисмутази SOD, глутатіонпероксидази GPx, відновленого глутатіону GSH) і зменшення кількості вільних радикалів (Chakraborty et al., 2012). Крім того, Lee et al. (2015) повідомили, що імбир може істотно впливати на метаболізм глюкози через шлях AS160, опосередкований AMPK $\alpha$ 2v (Lee et al., 2015). Шлях AS160 є одним із субстратів протеїнкінази B-Акт, яка фосфорилується за треоніном, а потім відокремлюється від GLUT4, що забезпечує її транслокацію до плазматичної мембрани (Minea et al., 2005). Біологічно активні сполуки імбиру можуть стимулювати чутливість до інсуліну, сприяючи регуляції адипонектину та рецептора  $\gamma$ , що активується проліфератором пероксисом (PPAR $\gamma$ ) (Isa et al., 2008), можуть стимулювати поглинання чутливої до інсуліну глюкози адипоцитами (Sekiya та ін., 2004) і відіграють інсуліноподібну роль, що призводить до збільшення периферичного використання глюкози, зростання запасів глікогену в м'язах і пригнічення глюконеогенезу в печінці та нирках (Almohaimed et al., 2021).

В останні роки кілька клінічних досліджень продемонстрували, що лікування імбиром може зменшити рівень глюкози в крові та запалення у пацієнтів з діабетом (Mahluji et al., 2013a; Mozaffari-Khosravi et al., 2014; Khandouzi et al., 2015). Вживання імбиру значно покращує чутливість до інсуліну та гомеостаз глюкози (Mahluji et al., 2013b; Arablou et al., 2014). Крім того, імбир продемонстрував сприятливий вплив на артеріальний тиск і функціонування ендотелію у пацієнтів із ЦД 2 типу (Azimi et al., 2016). Ці результати означають, що імбир може бути корисним для поліпшення метаболізму глюколіпідів і лікування діабетичних ускладнень.

### Вплив на редукцію надмірної ваги та ожиріння

Ожиріння стало глобальною проблемою здоров'я, яка має значний вплив на громадське здоров'я і збільшує ризик виникнення багатьох супутніх захворювань. Останнім часом у всьому світі спостерігається різке зростання поширеності надмірної ваги та ожиріння (Hales et al., 2020). Тому необхідно визначити нові шляхи вирішення проблеми, які є легкодоступними та ефективними для зниження ваги. Ожиріння збільшує ризик виникнення таких хвороб, як цукровий діабет типу 2, серцево-судинні захворювання, артеріальна гіпертензія, деякі види раку, захворювання печінки та інші метаболічні порушення (Kleinert et al., 2018).

Надлишок жирової тканини сприяє окиснювальному стресу та запаленню. Збільшений розмір і кількість адипоцитів сприяє інфільтрації фагоцитуючих лейкоцитів, індукуючи продукцію окиснювачів, які активують ядерний фактор В (NF- $\kappa$ B), тим самим збільшуючи транскрипцію прозапальних цитокінів, таких як фактор некрозу пухлини-альфа (TNF- $\alpha$ ), інтерлейкін 1 $\beta$  (IL-1 $\beta$ ) та інтерлейкін-6 (IL-6) (Coelho et al., 2013). Крім того, дослідження показали, що ожиріння, пов'язане зі споживанням продуктів з високим вмістом жиру (англ. *high fat diet*, HFD) змінює склад кишкової мікробіоти, сприяючи метаболічній ендотоксемії шляхом збільшення припливу мікробних компонентів, таких як ліпополісахариди (LPS), що викликає активацію макрофагів через залежний шлях Toll-like receiver 4 (TLR-4) (Caesar et al., 2015). Деякі шляхи, залучені в адипогенез,

регулюються рецепторними тирозинкіназами, АМР-активованою протеїнкіназою (AMPK), PPAR $\gamma$  і коактиватором 1 $\alpha$  PPAR $\gamma$  (PGC-1 $\alpha$ ), які чутливі до регуляції окисно-відновної системи (Liu et al., 2012).

Оскільки одним із методів лікування ожиріння є зміна дієти, необхідно шукати інформацію в науковій літературі, яка вказує на вплив нутрицевтиків на захисні механізми в лікуванні ожиріння та його метаболічних ускладнень. На даний момент дослідження повідомляють, що *Z. officinale* є нутрицевтиком в профілактиці і лікуванні ожиріння, посилюючи термогенез і вивільнення катехоламінів (Pulbutr et al., 2011), сприяючи ліполізу білої жирової тканини (Ahn і Oh, 2012).

Дослідження виявили кілька механізмів дії імбиру в лікуванні ожиріння, таких як контроль апетиту, зв'язування з рецепторами 5-HT $2c$  у центральній нервовій системі, здійснення модулюючого ефекту на 5-гідрокситриптамін (5-HT; серотонін) (Mansour et al., 2012), і зниження кишкового всмоктування жиру з продуктів, оскільки імбир проявляє пригнічувальну дію на панкреатичну ліпазу (Mahmoud et al., 2012). Крім того, імбир послаблює адипогенез через зниження експресії гена, пов'язаного з рецептором  $\gamma$ , активованим проліфератором пероксисом PPAR $\gamma$  (Tzeng et al., 2013); послаблює ліпогенез шляхом експресії деяких ферментів, які беруть участь у цьому процесі (синтази жирних кислот і ацетил-КоА-карбоксилази) (Okamoto et al., 2011); посилює ліполіз за рахунок підвищення активності гормончутливої ліпази (HSL), а також термогенез шляхом синтезу роз'єднуючого білка 1, а також вивільнення катехоламінів, які взаємодіють з бета-адренергічними рецепторами та активують симпатичну нервову систему (Mansour et al., 2012).

Було виявлено, що пероральне введення екстракту імбиру значно знижувало масу тіла та рівень ліпідів у сироватці крові у щурів, яких годували кормами з високим вмістом жиру (HFD) (Misawa et al., 2015). Крім того, було виявлено, що екстракт імбиру зменшує набір жирової маси, викликане HFD, посилюючи катаболізм жиру в скелетних м'язах і витрати енергії (Nammi et al., 2009). Зокрема, 6-гінгерол, одна з основних активних речовин імбиру, демонструє ефекти в лікуванні ожиріння шляхом зміни актив-



ності та експресії деяких ферментів-маркерів ліпідного обміну, таких як синтаза жирних кислот (FAS), ацетил-СоА-карбоксилаза, редуктаза 3-гідрокси-3-метило-глутарилокоензиму А, лецитин-холінацил-трансфераза та ліпопротеїніліпаза (Brahma Naidu et al., 2016). Крім того, 6-гінгерол пригнічував активність амілази та панкреатичної ліпази, що призводило до зниження рівня ліпідів у плазмі та тканинах (Saravanan et al., 2014). Ефект впливу імбиру в лікуванні ожиріння може бути пов'язаний з його протизапальними властивостями. Дослідження показали, що екстракт імбиру та 6-гінгерол можуть значно знижувати рівень мРНК інтерлейкіну-6 (IL-6) і фактора некрозу пухлини  $\alpha$  (TNF- $\alpha$ ) у жировій тканині щурів-самців, яких годували HFD (Nammi et al., 2009; Brahma Naidu et al., 2016).

Було доведено, що введення 50 % спиртового екстракту з кореневищ імбиру може запобігти розвитку ожиріння (Misawa et al., 2015) та інсулінорезистентності у щурів (Misawa et al., 2015), зокрема, шляхом регулювання рецепторів PPAR. Інші дослідження показали, що 95 % етанольний екстракт імбиру, який вводили самцям щурів Sprague-Dawley, збільшував енерговитрати організму, зменшував розмір адипоцитів і призвів до активації системи терморегуляції в жировій тканині за рахунок підвищення рівня теплопродукції. Автори дійшли висновку, що додавання екстрактів імбиру разом із дієтою з високим вмістом фруктози призводить до зменшення ефектів резистентності до інсуліну та пригнічує активність прозапальних цитокінів, які пов'язані з макрофагами жирової тканини (Wang et al., 2020). Крім того, останнє дослідження довело, що імбир, який вводили самцям щурів, покращив склад кишкової мікробіоти, яка була зруйнована дієтою з високим вмістом жиру, що може бути важливим для відновлення рівноваги організму (Wang et al., 2020; Wang et al., 2017). Suk et al. (2017) припустили, що гінгеренон зменшує процес ожиріння, спричинений HFD дієтою, шляхом зменшення маси жирової тканини у мишей. Він пригнічує розвиток жирової тканини та запалення за рахунок активації АМФ-активованої протеїнкінази, інгібуючи адипогенну диференціацію та агрегацію ліпідів у клітинній лінії 3T3-L1 (Suk et al., 2017).

Стимулятори рецептора  $\delta$ , активованого проліфератором пероксисом (PPAR $\delta$ ), продемонстрували істотний ефект в лікуванні ожиріння (Perreault et al., 2008). Комбінація 1,3% 6-шогаолу та 4,8% 6-гінгеролу (18 тижнів перорального введення) проявляла регуляторний вплив на передачу сигналів PPAR $\delta$  у мишей C57BL/6J і була лігандом PPAR $\delta$ , активуючи експресію PPAR $\delta$  у клітинній лінії міофібрил скелетних м'язів. Результати досліджень свідчать про те, що після активації шляху PPAR $\delta$  за допомогою імбиру зменшується ожиріння, а ефективність фізичних навантажень збільшується за рахунок підвищення катаболізму жирів в скелетних м'язах (Misawa et al., 2015). Крім того, пероральне введення 5% порошку імбиру (4 тижні лікування) значно знизило масу тіла, що супроводжувалося позитивним впливом на рівень пероксисомної каталази без пригнічення рівня панкреатичної ліпази або будь-якого впливу на рівень білірубину у самців щурів-альбіносів (Mahmoud et al., 2013).

Адипогенез являє собою складний процес клітинної диференціації, за допомогою якого преадипоцити перетворюються в адипоцити. Повідомлялося, що 6-гінгерол може ефективно пригнічувати диференціацію преадипоцитів в адипоцити і запобігати відкладенню тригліцеридів. Це також запобігає накопиченню ліпідів і знижує експресію факторів транскрипції, пов'язаних з адипогенезом, і ключових ліпогенних ферментів у клітинах 3T3-L1 (Tzeng et al., 2013; Li & Zhou, 2015). 6-шогаол, ще одна основна біоактивна складова імбиру, проявляє значно істотніший вплив на інгібування адипогенезу преадипоцитів 3T3-L1 і зниження експресії різних адипогенних і ліпогенних маркерних білків (Suk et al., 2016). Крім того, аналіз клітинного дихання показав, що культивовані міофібрили скелетних м'язів, попередньо оброблені екстрактом імбиру, збільшували швидкість споживання кисню, викликану пальмітатом, що призводило до збільшення клітинного катаболізму жирних кислот (Misawa et al., 2015).

Незважаючи на описані вище експерименти *in vitro* та *in vivo* на тваринах, доступно лише кілька клінічних випробувань імбиру. Відсутність клінічних досліджень можна пояснити численними факторами, включаючи етичні проблеми, обмежену комерційну підтримку та складний хіміч-



ний склад імбиру (Wang et al., 2017). Наприклад, раннє дослідження показало, що споживання імбиру з їжею може посилити термогенез і зменшити відчуття голоду (Mansour et al., 2012). Крім того, додавання імбиру виказало сприятливий вплив на втрату ваги та деякі параметри, пов'язані з ожирінням у дорослих із надмірною вагою та ожирінням (Ebrahimzadeh Attari et al., 2015, 2016). Тому необхідні подальші дослідження, щоб вивчити потенційне застосування імбиру для контролю ваги.

### **Вплив на серцево-судинні захворювання**

Серцево-судинні захворювання (ССЗ) є однією з найвагоміших причин захворюваності та смертності в усьому світі. Фактори ризику серцево-судинних захворювань включають ожиріння, куріння, вживання алкоголю, гіперліпідемію, гіпертензію та гіпергомоцистеїнемію (Benjamin et al., 2018; Laslett et al., 2012).

Атеросклероз є однією з основних патологій серцево-судинної системи, яке характеризується утворенням внутрішньосудинних нальотів, відомих як атеросклеротичні бляшки, на стінках артерій. Це може привести до стенозу (звуження) артерій, що обмежує потік крові, або до руйнування бляшки з наступним утворенням тромбу, що може заблокувати артерію і спричинити серцевий напад чи інсульт. Причому гострий інфаркт міокарда (серцевий напад) і інсульт є серйозними ускладненнями атеросклерозу і можуть призвести до високого ризику смертності (Lusis, 2000). Агресія проти ендотелію породжує ендотеліальну дисфункцію, запальні реакції, проліферацію гладком'язових клітин судин, накопичення та окиснення ліпідів, утворення атеросклеротичних бляшок, зміну судинного ремоделювання та розвиток атеросклерозу (Yang et al., 2017; Wang et al., 2018, 2019). Антигіпертензивні препарати можуть мати побічні ефекти, такі як головний біль, запаморочення, втома, проблеми з шлунком тощо. Тому рослинні засоби стали предметом досліджень як можливі альтернативні методи лікування гіпертонії (Barsky et al., 2002). Численні дослідження довели, що імбир і його інгредієнти можуть проявляти гіпотензивний і захисний ефект на серцево-судинну систему (Ghayur і Gilani,

2005; Elkhishin і Awwad, 2009; Wen et al., 2020).

Зміна способу життя, зокрема дієти, може суттєво впливати на здоров'я серцево-судинної системи і знижувати ризик судинних захворювань (Libby et al., 2019). Імбир може бути важливою складовою здорової дієти через його терапевтичні властивості та потенційні користі для серцево-судинної системи (Roudsari et al., 2021). Фенольні сполуки, які містяться в імбирі, відомі своєю антиоксидантною дією, захищаючи клітини від ушкоджень, спричинених вільними радикалами, що можуть сприяти розвитку атеросклерозу та інших серцево-судинних захворювань. Крім того, антиоксидантні властивості можуть допомагати попередити окиснення ліпідів (холестерину) в крові, що є одним із критеріїв розвитку атеросклерозу. Також, імбир може сприяти судинорозширювальному ефекту шляхом збільшення виробництва оксиду азоту, який є важливим молекулярним сигналізатором, що розширює судини. Це може допомогти знизити артеріальний тиск та поліпшити кровообіг (Grassi et al., 2010; El-Seweidy et al., 2015; Srinivasan, 2017; Wu et al., 2018; Razali et al., 2020). Імбир також знижує рівень гомоцистеїну (Atazadegan et al., 2021). Дійсно, перехресне дослідження за участю 4628 учасників показало, що щоденне споживання імбиру (1 г/день) викликало зниження ризику гіпертонії та ішемічної хвороби серця у дорослих в віці 18 років і старших (Wang et al., 2017).

Кілька досліджень показали, що споживання імбиру та біоактивних речовин, отриманих з імбиру, пов'язане зі зниженням ризику ССЗ (Fuhrman et al., 2000; Akinyemi et al., 2014; Lei et al., 2014; Imani et al., 2015). Гіперліпідемія, яка характеризується підвищенням концентрації тригліцеридів у плазмі крові та зниженням фракції ліпопротеїнів високої щільності, є одним із основних факторів ризику розвитку атеросклерозу та пов'язаних із ним ССЗ. Було виявлено, що екстракт імбиру значно знизив рівень тригліцеридів і холестерину в плазмі як у моделі щурів, яких годували HFD (Son et al., 2015), так і в моделі щурів з гіперхолестеринемією (Matsuda et al., 2009; ElRokh et al., 2010). Вважається, що окиснювальна модифікація LDL є ключем до патогенезу атеросклерозу. Було виявлено, що антиатерогенна дія

імбиру була пов'язана зі значним зниженням рівня холестерину в плазмі крові та значним зниженням основного окисного стану фракції ліпопротеїнів низької щільності (ЛПНЩ), а також їх сприйнятливостю до окиснення та агрегації у мишей з дефіцитом аполіпопротеїну Е (Е0). Ці результати дослідження вказують на потенційні корисні властивості імбиру для здоров'я серцево-судинної системи (Fuhrman et al., 2000). Крім того, 6-шогаол може запобігти розвитку атеросклерозу та розриву бляшок, викликаного окисненими ЛПНЩ, ймовірно, завдяки своїм антиоксидантним і протизапальним властивостям (Wang et al., 2013).

У клінічному дослідженні на групі пацієнтів віком до 50 років було виявлено, що імбир знижує як систолічний, так і діастолічний артеріальний тиск протягом  $\leq 8$  тижнів лікування дозою імбиру  $\geq 3$  г на день. Механізм його дії в цьому аспекті ще не вивчений, але вважається, що його терапевтичний потенціал може бути пов'язаний з його антиоксидантною активністю (Mustafa et al., 2019; Fahmi et al., 2019) завдяки присутності фенольних сполук, таких як шогаоли, зінгерони, парадол і гінгероли, які, як було доведено, є сильними антиоксидантами (Mao et al., 2019). У літературі наводяться приклади кореляції між антиоксидантним потенціалом і функціонуванням серцево-судинної системи. Регуляція може здійснюватися шляхом зменшення перекисного окиснення ліпідів, що може спричинити звуження судин і підвищення артеріального тиску (АТ) (Hasani et al., 2019). Крім того, ці сполуки є хорошими вазодилататорами завдяки їх дії на підвищення рівня оксиду азоту в плазмі, що також може зменшити концентрацію прозапальних цитокінів і агрегацію тромбоцитів (Wu et al., 2018).

Ангіотензин-1-перетворюючий фермент (АПФ) відіграє ключову роль у регуляції судинного тону та артеріального тиску (Akinyemi et al., 2014). Вважається, що підвищення активності АПФ може сприяти розвитку гіпертонії. Це стосується процесу перетворення ангіотензину I в ангіотензин II, який є потужним вазоконстриктором, що збільшує артеріальний тиск. Коли активність АПФ збільшується, більше ангіотензину I перетворюється в ангіотензин II, що призводить до звуження кровоносних судин і підвищення артеріального тиску.

Антигіперхолестеринемічні властивості імбиру спостерігалися на моделі щурів, яких годували кормом з високим вмістом холестерину (Akinyemi et al., 2014). Активність деяких ключових ферментів, таких як АПФ і аргіназа, пригнічувалася, і спостерігалося супутнє підвищення рівня NO. Одночасно антигіпертензивний ефект імбиру також був пов'язаний з гіперактивністю тромбоцитів і потенційними нейропротекторними ефектами (Akinyemi et al., 2016). Ці додаткові механізми можуть допомагати пояснити антигіпертензивний ефект імбиру, а також його потенційні користі для захисту серцево-судинної та нервової систем від ушкоджень.

Аномалії у конфігурації ліпідів, зокрема підвищення рівнів тригліцеридів, є одним із основних факторів ризику ССЗ, особливо у пацієнтів на перитонеальному діалізі (ПД). Пацієнти з хронічною нирковою недостатністю, які отримують діаліз, часто мають порушення обміну ліпідів, що може призвести до збільшення ризику розвитку серцево-судинних ускладнень. Лікування імбиром може мати благотворний вплив на рівень тригліцеридів у сироватці крові у пацієнтів на ПД. Зниження рівнів тригліцеридів може бути корисним, оскільки високі рівні тригліцеридів пов'язані з підвищеним ризиком розвитку атеросклерозу та інших ССЗ (Imani et al., 2015). На основі наведених вище результатів зроблено висновок, що сприятливий вплив імбиру на контроль ліпідних розладів, зниження рівня холестерину в плазмі крові, запобігання гіпертонії та покращення функції ендотелію сприяє профілактиці серцево-судинних і метаболічних розладів.

#### Можливий вплив імбиру на довголіття

Імбир є традиційною лікарською та їстівною рослиною з багатьма корисними властивостями. Тим не менш, вплив і потенційний механізм дії імбиру на процеси, які запобігають старінню залишаються невідомими. В дослідженні Xu et al. (2022) була спроба зрозуміти ефект щодо старіння та потенційні механізми дії імбиру щодо вільноживучої нематоди *Caenorhabditis elegans*. Поточні результати показали, що тривалість життя *C. elegans* була подовжена на 23,16% при додаванні 60 мкг/мл екстракту імбиру (GE), і це в

основному пояснювалося дією основних біоактивних компонентів імбиру, зокрема, 6-, 8-, 10-гінгеролу і 6-, 8-, 10-шогаолу. Екстракт з імбиру покращував рух нематод і послаблював накопичення ліпофусцину, а також підвищував стійкість до стресу шляхом посилення експресії пов'язаних зі стресом генів і активації факторів транскрипції DAF-16 і SKN-1. Крім того, аналіз

тривалості життя відносних мутантів показав, що екстракт з імбиру опосередковує подовження тривалості життя через сигнальний шлях інсуліну/IGF-1 (IIS) (рис. 7). Таким чином, імбир подовжує тривалість життя нематод (*C. elegans*) і збільшує стійкість до стресу; ці ефекти залежать від активації шляху IIS (Xu et al., 2022).

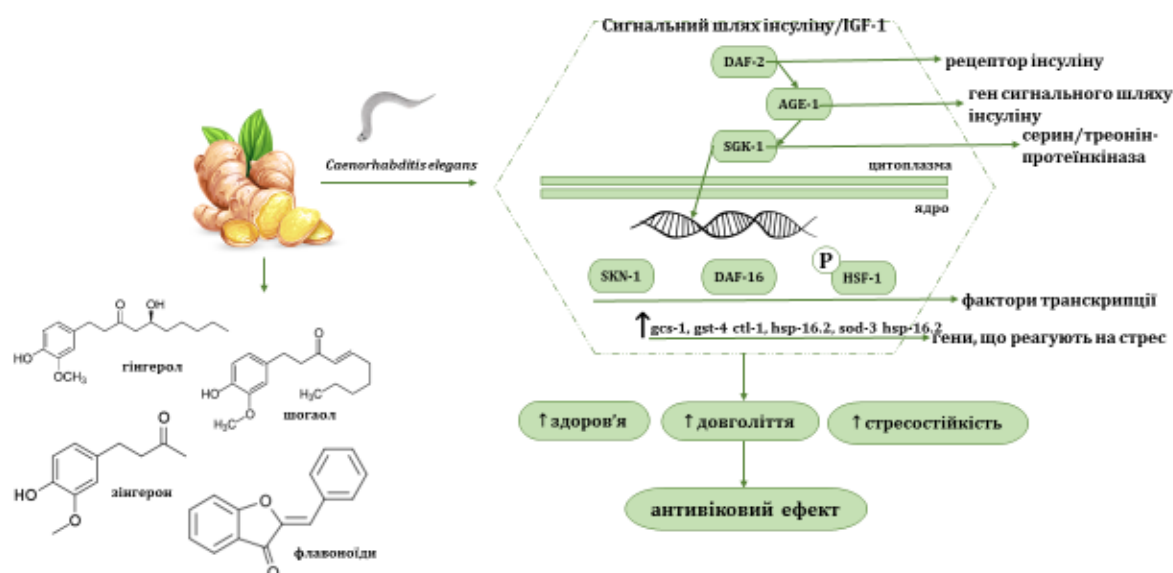


Рис. 7. Сигнальний шлях інсуліну/IGF-1 (за Xu et al., 2022)

### Неалкогольна жирова хвороба печінки (НАЖХП)

НАЖХП є хворобою, що виникає в результаті накопичення жиру в печінці при відсутності споживання алкоголю у значних кількостях. Це є однією з найпоширеніших хвороб печінки у світі, і її поширеність швидко зростає, особливо у зв'язку з епідемією ожиріння та метаболічним синдромом (Chalasan et al., 2012). Декілька факторів (накопичення ліпідів у печінці, окиснювальний стрес і запалення) беруть участь у патологічних метаболічних механізмах, які зрештою призводять до накопичення жиру в печінці та прогресування НАЖХП (Lai et al., 2016). Повідомлялося, що імбир володіє значними терапевтичними ефектами в лікуванні НАЖХП як у дослідженнях *in vivo*, так і *in vitro*. Етанольний екстракт імбиру може полегшити спричинене фруктозою ожиріння печінки та пригнічувати ліпогенез *de novo* в печінці щурів (Gao et al., 2012). Результати іншого експерименту показали, що

6-гінгерол може захищати від стеатозу печінки, викликаного дієтою HFD, і пов'язаних з ним метаболічних розладів шляхом зниження індукції запальних цитокінів (Tzeng et al., 2015a). У тваринній моделі стеатогепатиту, індукованого дієтою з дефіцитом метіоніну та холіну (MCD), 6-гінгерол регулював експресію ключових генів, пов'язаних з метаболізмом ліпідів і процесами запалення, і продемонстрував інгібуючу дію на стеатоз печінки (Tzeng et al., 2015b). Дослідження *in vitro* продемонстрували, що попередня інкубація з 6-гінгеролом значно послабила накопичення ліпідів і пом'якшила надмірну продукцію клітинних жирових крапель і запальних цитокінів в лінії клітин раку печінки людини HepG2 (Tzeng et al., 2015a,b). Крім того, 6-гінгерол може потенційно захищати від IL-1 $\beta$ -індукованого запалення та окиснювального стресу в клітинах гепатоцитів людини (HuH-7) (Li et al., 2013). Окрім лабораторних результатів, клінічне випробування також продемонструвало, що додавання імбиру призвело до значного

зниження активності аланінамінотрансферази,  $\gamma$ -глутамілтрансферази, вмісту запальних цитокінів, а також індексу інсулінорезистентності та ступеня стеатозу печінки порівняно з плацебо (Rahimlou et al., 2016). Загалом, поточні дані є переконливими доказами того, що імбир та його активні компоненти мають позитивний ефект, який може сприяти лікуванню НАЖХП.

### Хронічна хвороба нирок (ХХН)

Імбир може мати потенційну користь для пацієнтів з хронічною хворобою нирок (ХХН), особливо для тих, хто має діабет або гіпертонію, які є двома з основних причин розвитку ХХН (Webster et al., 2017). Крім того, ХХН характеризується прогресуючою та необоротною втратою нефронів, а хронічне запалення є ключовою особливістю, яка призводить до прогресуючого фіброзу і незворотного ураження нирок із численними метаболічними змінами, які завершуються загостренням запалення та окиснювальним стресом, дерегуляцією мікробіоти та посиленням ризику ССЗ (Ruiz-Ortega et al., 2020). Кілька експериментальних досліджень оцінювали вплив імбиру та його метаболітів на ХХН і спостерігали його нефропротекційні ефекти шляхом послаблення морфо-патологічних змін, характерних для хвороби, пом'якшення запалення та ниркового окиснювального стресу, а також зменшення маркерів фіброзної та ниркової токсичності, таких як трансформуючий  $\beta$ -фактор росту (TGF) і молекула пошкодження нирок-1 (KIM-1) (Mahmoud et al., 2012; Al Hroob et al., 2018; Cui et al., 2018; Rehman et al., 2019). Імбир можна використовувати для уповільнення прогресування ХХН і запобігання клінічним ускладненням (Ruiz-Ortega et al., 2020).

Хоча імбір є популярним рослинним продуктом, який часто використовується в харчових добавках та традиційній медицині, клінічних досліджень щодо його впливу на пацієнтів, які проходять гемодіаліз (ГД), дійсно є мало (Bahall, 2017). Група дослідників розробила рандомізоване подвійне сліпе плацебо-контрольоване дослідження пацієнтів із ХХН на перитонеальному діалізі та опублікувала дві статті про свої результати. Після прийому 1 г імбиру щодня протягом 10 тижнів Imani et al. (2015) не спостерігали суттєвих

відмінностей щодо параметрів, пов'язаних із системним і судинним запаленням, прогресуючими кінцевими продуктами глікації та окиснювальним стресом між групами плацебо і експериментальною. Лише рівень глюкози в сироватці крові натще знизився на 20 % порівняно з вихідним рівнем (Imani et al., 2015). У другій опублікованій статті Tabibi et al. (2016) спостерігали, що у пацієнтів, які вживали імбир, знижувався рівень інтерлейкіну-6 (IL-6) і тригліцеридів у сироватці крові (Tabibi et al., 2016). Багато знань про корисні властивості імбиру базуються на результатах лабораторних досліджень на тваринах та відносно невеликих клінічних досліджень на людях. Хоча ці дослідження можуть надати деякі вказівки на потенційну користь імбиру для пацієнтів з ХХН, вони не дають повного уявлення про ефективність та безпеку його застосування у цій групі пацієнтів.

### Висновки

Імбир (*Zingiber officinale*) є одним з найбільш часто використовуваних рослин у світі і відомий своїми багатими смаковими та лікувальними властивостями. Він використовується як спеція для приправлення страв у кулінарії, а також використовується в традиційній медицині для лікування різних захворювань. У цій статті ми розглянули широкий спектр фітотерапевтичних застосувань імбиру, який включає його потенційні користі для здоров'я. Зокрема, було виявлено, що імбир проявляє антиоксидантні властивості, сприяє зниженню запальних процесів, покращує функціонування шлунково-кишкового тракту та може мати корисний вплив на серцево-судинну систему. Дослідження показали, що імбир може бути ефективним у зниженні рівня цукру в крові та холестерину, контролі артеріального тиску та зменшенні запальних процесів в організмі. Крім того, він також може мати потенційну користь для пацієнтів з гастроінтестинальними проблемами, такими як дискомфорт у шлунку та запори.

Імбир та його компоненти мають потенційні корисні властивості для лікування метаболічного синдрому. Дослідження показують, що він може сприяти зниженню рівня цукру в крові натще (FBS) та глікованого гемоглобіну (HbA1C), а також знижувати резистентність до

інсуліну. Крім того, імбир може мати позитивний вплив на артеріальний тиск, допомагаючи знижувати його значення. Також було виявлено, що він сприяє катаболізму жиру в скелетних м'язах шляхом активації сигнального шляху AMPK. Це може бути особливо корисним для людей з метаболічним синдромом, оскільки зменшення рівня жирової маси може позитивно впливати на їхнє загальне здоров'я та знизити ризик розвитку серцево-судинних захворювань. Враховуючи ці результати, імбир може бути розглянутий як потенційний компонент комплексного лікування метаболічного синдрому (ожиріння або надмірна вага, інсулінорезистентність, артеріальна гіпертензія, дисліпідемія). Враховуючи всі ці фактори, варто розглядати імбір як один із потенційних компонентів комплексного підходу до підтримання здоров'я та лікування різноманітних захворювань.

Хоча деякі компоненти рослин роду *Zingiber* мають значну фармакологічну активність і потенційні корисні власти-

вості для здоров'я, клінічні застосування все ще залишаються нечастими через кілька чинників. По-перше, безпека використання цих рослин у людей не завжди чітко встановлена. Хоча вони вважаються безпечними для більшості людей при помірному споживанні, можуть виникнути певні побічні ефекти або взаємодії з лікарськими засобами у деяких осіб або при використанні великих доз. По-друге, існує обмежена кількість клінічних досліджень, спрямованих на вивчення механізмів дії та фармакологічної активності цих рослин. Більшість досліджень є лабораторними або проведеними на тваринах, і потребують додаткових клінічних досліджень на людях для підтвердження їх ефективності та безпеки. Отже, перед широким застосуванням рослин роду *Zingiber* у клінічній практиці необхідно провести більше досліджень, як лабораторних, так і клінічних, для оцінки їхньої ефективності, безпеки та механізмів дії. Тільки після цього можна буде розглядати їх широке застосування їх у медичній практиці.

### Фінансування / Funding

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

### Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Не застосовується / Not applicable.

### Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Не застосовується / Not applicable.

### Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

### Конфлікт інтересів / Conflicts of Interest

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

### References

- Abdulrazaq, N. B., Cho, M. M., Win, N. N., Zaman, R., & Rahman, M. T. (2012). Beneficial effects of ginger (*Zingiber officinale*) on carbohydrate metabolism in streptozotocin-induced diabetic rats. *The British journal of nutrition*, 108(7), 1194–1201. <https://doi.org/10.1017/S0007114511006635>
- Aeschbach, R., Löliger, J., Scott, B. C., Murcia, A., Butler, J., Halliwell, B., & Aruoma, O. I. (1994). Antioxidant actions of thymol, carvacrol, 6-gingerol, zingerone and hydroxytyrosol. *Food and chemical toxicology: an international journal published for the British Industrial Biological Research Association*, 32(1), 31–36. [https://doi.org/10.1016/0278-6915\(84\)90033-4](https://doi.org/10.1016/0278-6915(84)90033-4)



- Ahn, E.K., & Oh, J.S. (2012). Inhibitory effect of galanolactone isolated from *Zingiber officinale* roscoe extract on adipogenesis in 3T3-L1 cells. *Journal of Applied Biological Chemistry*, 55, 63–68. <https://doi.org/10.1007/s13765-012-0011-6>
- Akinyemi, A. J., Ademiluyi, A. O., & Oboh, G. (2014). Inhibition of angiotensin-1-converting enzyme activity by two varieties of ginger (*Zingiber officinale*) in rats fed a high cholesterol diet. *Journal of medicinal food*, 17(3), 317–323. <https://doi.org/10.1089/jmf.2012.0264>
- Akinyemi, A. J., Thomé, G. R., Morsch, V. M., Bottari, N. B., Baldissarelli, J., de Oliveira, L. S., Goularte, J. F., Belló-Klein, A., Oboh, G., & Schetinger, M. R. (2016). Dietary Supplementation of Ginger and Turmeric Rhizomes Modulates Platelets Ectonucleotidase and Adenosine Deaminase Activities in Normotensive and Hypertensive Rats. *Phytotherapy research: PTR*, 30(7), 1156–1163. <https://doi.org/10.1002/ptr.5621>
- Al Hroob, A. M., Abukhalil, M. H., Alghonmeen, R. D., & Mahmoud, A. M. (2018). Ginger alleviates hyperglycemia-induced oxidative stress, inflammation and apoptosis and protects rats against diabetic nephropathy. *Biomedicine & pharmacotherapy = Biomedecine & pharmacotherapie*, 106, 381–389. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2018.06.148>
- Al-Amin, Z. M., Thomson, M., Al-Qattan, K. K., Peltonen-Shalaby, R., & Ali, M. (2006). Anti-diabetic and hypolipidaemic properties of ginger (*Zingiber officinale*) in streptozotocin-induced diabetic rats. *The British journal of nutrition*, 96(4), 660–666. <https://doi.org/10.1079/bjn20061849>
- Alberti, K. G., Zimmet, P., Shaw, J., & IDF Epidemiology Task Force Consensus Group (2005). The metabolic syndrome – a new worldwide definition. *Lancet (London, England)*, 366(9491), 1059–1062. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(05\)67402-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(05)67402-8)
- Ali, B. H., Blunden, G., Tanira, M. O., & Nemmar, A. (2008). Some phytochemical, pharmacological and toxicological properties of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe): a review of recent research. *Food and chemical toxicology: an international journal published for the British Industrial Biological Research Association*, 46(2), 409–420. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2007.09.085>
- Almohaimed, H. M., Mohammedsleh, Z. M., Batawi, A. H., Balgoon, M. J., Ramadan, O. I., Baz, H. A., Al Jaouni, S., & Ayuob, N. N. (2021). Synergistic Anti-inflammatory and Neuroprotective Effects of *Cinnamomum cassia* and *Zingiber officinale* Alleviate Diabetes-Induced Hippocampal Changes in Male Albino Rats: Structural and Molecular Evidence. *Frontiers in cell and developmental biology*, 9, 727049. <https://doi.org/10.3389/fcell.2021.727049>
- Arablou, T., Aryaeian, N., Valizadeh, M., Sharifi, F., Hosseini, A., & Djalali, M. (2014). The effect of ginger consumption on glycemic status, lipid profile and some inflammatory markers in patients with type 2 diabetes mellitus. *International journal of food sciences and nutrition*, 65(4), 515–520. <https://doi.org/10.3109/09637486.2014.880671>
- Atazadegan, M. A., Bagherniya, M., Askari, G., Tasbandi, A., & Sahebkar, A. (2021). The Effects of Medicinal Plants and Bioactive Natural Compounds on Homocysteine. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 26(11), 3081. <https://doi.org/10.3390/molecules26113081>
- Azimi, P., Ghasvand, R., Feizi, A., Hosseinzadeh, J., Bahreynian, M., Hariri, M., & Khosravi-Boroujeni, H. (2016). Effect of cinnamon, cardamom, saffron and ginger consumption on blood pressure and a marker of endothelial function in patients with type 2 diabetes mellitus: A randomized controlled clinical trial. *Blood pressure*, 25(3), 133–140. <https://doi.org/10.3109/08037051.2015.1111020>
- Bahall, M. (2017). Use of complementary and alternative medicine by patients with end-stage renal disease on haemodialysis in Trinidad: A descriptive study. *BMC complementary and alternative medicine*, 17(1), 250. <https://doi.org/10.1186/s12906-017-1755-7>

- Baliga, M. S., Haniadka, R., Pereira, M. M., D'Souza, J. J., Pallaty, P. L., Bhat, H. P., & Popuri, S. (2011). Update on the chemopreventive effects of ginger and its phytochemicals. *Critical reviews in food science and nutrition*, 51(6), 499–523. <https://doi.org/10.1080/10408391003698669>
- Banihani, S.A. (2018). Ginger and Testosterone. *Biomolecules*, 8(4), 119. <https://doi.org/10.3390/biom8040119>
- Baptista, B. G., Ribeiro, M., Cardozo, L. F., Leal, V. O., Regis, B., & Mafra, D. (2022). Nutritional benefits of ginger for patients with non-communicable diseases. *Clinical nutrition ESPEN*, 49, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2022.04.017>
- Barsky, A. J., Saintfort, R., Rogers, M. P., & Borus, J. F. (2002). Nonspecific medication side effects and the nocebo phenomenon. *JAMA*, 287(5), 622–627. <https://doi.org/10.1001/jama.287.5.622>
- Benjamin, E. J., Virani, S. S., Callaway, C. W., Chamberlain, A. M., Chang, A. R., Cheng, S., Chiuve, S. E., Cushman, M., Delling, F. N., Deo, R., de Ferranti, S. D., Ferguson, J. F., Fornage, M., Gillespie, C., Isasi, C. R., Jiménez, M. C., Jordan, L. C., Judd, S. E., Lackland, D., Lichtman, J. H., ... American Heart Association Council on Epidemiology and Prevention Statistics Committee and Stroke Statistics Subcommittee (2018). Heart Disease and Stroke Statistics-2018 Update: A Report From the American Heart Association. *Circulation*, 137(12), e67–e492. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000558>
- Bhandari, U., Kanojia, R., & Pillai, K. K. (2005). Effect of ethanolic extract of *Zingiber officinale* on dyslipidaemia in diabetic rats. *Journal of ethnopharmacology*, 97(2), 227–230. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2004.11.011>
- Bordia, A., Verma, S. K., & Srivastava, K. C. (1997). Effect of ginger (*Zingiber officinale* Rosc.) and fenugreek (*Trigonella foenumgraecum* L.) on blood lipids, blood sugar and platelet aggregation in patients with coronary artery disease. *Prostaglandins, leukotrienes, and essential fatty acids*, 56(5), 379–384. [https://doi.org/10.1016/s0952-3278\(97\)90587-1](https://doi.org/10.1016/s0952-3278(97)90587-1)
- Brahma Naidu, P., Uddandrao, V. V., Ravindar Naik, R., Suresh, P., Meriga, B., Begum, M. S., Pandiyan, R., & Saravanan, G. (2016). Ameliorative potential of gingerol: Promising modulation of inflammatory factors and lipid marker enzymes expressions in HFD induced obesity in rats. *Molecular and cellular endocrinology*, 419, 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.mce.2015.10.007>
- Butt, M. S., & Sultan, M. T. (2011). Ginger and its health claims: molecular aspects. *Critical reviews in food science and nutrition*, 51(5), 383–393. <https://doi.org/10.1080/10408391003624848>
- Caesar, R., Tremaroli, V., Kovatcheva-Datchary, P., Cani, P. D., & Bäckhed, F. (2015). Crosstalk between Gut Microbiota and Dietary Lipids Aggravates WAT Inflammation through TLR Signaling. *Cell metabolism*, 22(4), 658–668. <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2015.07.026>
- Chakraborty, D., Mukherjee, A., Sikdar, S., Paul, A., Ghosh, S., & Khuda-Bukhsh, A. R. (2012). [6]-Gingerol isolated from ginger attenuates sodium arsenite induced oxidative stress and plays a corrective role in improving insulin signaling in mice. *Toxicology letters*, 210(1), 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2012.01.002>
- Chalasan, N., Younossi, Z., Lavine, J. E., Diehl, A. M., Brunt, E. M., Cusi, K., Charlton, M., Sanyal, A. J., American Gastroenterological Association, American Association for the Study of Liver Diseases, & American College of Gastroenterology. (2012). The diagnosis and management of non-alcoholic fatty liver disease: practice guideline by the American Gastroenterological Association, American Association for the Study of Liver Diseases, and American College of Gastroenterology. *Gastroenterology*, 142(7), 1592–1609. <https://doi.org/10.1053/j.gastro.2012.04.001>

- Coelho, M., Oliveira, T., & Fernandes, R. (2013). Biochemistry of adipose tissue: an endocrine organ. *Archives of medical science: AMS*, 9(2), 191–200. <https://doi.org/10.5114/aoms.2013.33181>
- Cornier, M. A., Dabelea, D., Hernandez, T. L., Lindstrom, R. C., Steig, A. J., Stob, N. R., Van Pelt, R. E., Wang, H., & Eckel, R. H. (2008). The metabolic syndrome. *Endocrine reviews*, 29(7), 777–822. <https://doi.org/10.1210/er.2008-0024>
- Cui, Y., Shi, Y., Bao, Y., Wang, S., Hua, Q., & Liu, Y. (2018). Zingerone attenuates diabetic nephropathy through inhibition of nicotinamide adenine dinucleotide phosphate oxidase 4. *Biomedicine & pharmacotherapy = Biomedecine & pharmacotherapie*, 99, 422–430. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2018.01.051>
- Deng, M., Yun, X., Ren, S., Qing, Z., & Luo, F. (2022). Plants of the Genus Zingiber: A Review of Their Ethnomedicine, Phytochemistry and Pharmacology. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 27(9), 2826. <https://doi.org/10.3390/molecules27092826>
- Després, J. P., & Lemieux, I. (2006). Abdominal obesity and metabolic syndrome. *Nature*, 444(7121), 881–887. <https://doi.org/10.1038/nature05488>
- Drucker, D. J., & Nauck, M. A. (2006). The incretin system: glucagon-like peptide-1 receptor agonists and dipeptidyl peptidase-4 inhibitors in type 2 diabetes. *Lancet (London, England)*, 368(9548), 1696–1705. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(06\)69705-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(06)69705-5)
- Duan, W., Liang, L., Huang, Y., Zhang, Y., Sun, B., & Li, L. (2021). Effect of Ginger on Chemical Composition, Physical and Sensory Characteristics of Chicken Soup. *Foods (Basel, Switzerland)*, 10(7), 1456. <https://doi.org/10.3390/foods10071456>
- Dugasani, S., Pichika, M. R., Nadarajah, V. D., Balijepalli, M. K., Tandra, S., & Korlakunta, J. N. (2010). Comparative antioxidant and anti-inflammatory effects of [6]-gingerol, [8]-gingerol, [10]-gingerol and [6]-shogaol. *Journal of ethnopharmacology*, 127(2), 515–520. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2009.10.004>
- Ebrahimzadeh Attari, V., Asghari Jafarabadi, M., Zemestani, M., & Ostadrahimi, A. (2015). Effect of *Zingiber officinale* Supplementation on Obesity Management with Respect to the Uncoupling Protein 1 -3826A>G and  $\beta$ 3-adrenergic Receptor Trp64Arg Polymorphism. *Phytotherapy research: PTR*, 29(7), 1032–1039. <https://doi.org/10.1002/ptr.5343>
- Ebrahimzadeh Attari, V., Ostadrahimi, A., Asghari Jafarabadi, M., Mehralizadeh, S., & Mahluji, S. (2016). Changes of serum adipocytokines and body weight following *Zingiber officinale* supplementation in obese women: a RCT. *European journal of nutrition*, 55(6), 2129–2136. <https://doi.org/10.1007/s00394-015-1027-6>
- Elkhishin, I.A., & Awwad, I.A. (2009). A study of the cardiovascular toxic effects of *Zingiber officinale* (ginger) in adult male albino rats and its possible mechanisms of action. *MJFCT*, 17, 109–127
- ElRokh, el-S. M., Yassin, N. A., El-Shenawy, S. M., & Ibrahim, B. M. (2010). Antihypercholesterolaemic effect of ginger rhizome (*Zingiber officinale*) in rats. *Inflammopharmacology*, 18(6), 309–315. <https://doi.org/10.1007/s10787-010-0053-5>
- El-Seweidy, M. M., Asker, M. el-S., Eldahmy, S. I., Atteia, H. H., & Abdallah, M. A. (2015). Haemostatic risk factors in dyslipidemic rabbits: role of 10-dehydrogingerdione as a new hypolipemic agent. *Journal of thrombosis and thrombolysis*, 39(2), 196–202. <https://doi.org/10.1007/s11239-014-1150-x>

- Fahmi, A., Hassanen, N., Abdur-Rahman, M., & Shams-Eldin, E. (2019). Phytochemicals, antioxidant activity and hepatoprotective effect of ginger (*Zingiber officinale*) on diethylnitrosamine toxicity in rats. *Biomarkers: biochemical indicators of exposure, response, and susceptibility to chemicals*, 24(5), 436–447. <https://doi.org/10.1080/1354750X.2019.1606280>
- Fathi, R., Akbari, A., Nasiri, K., & Chardahcherik, M. (2021). Ginger (*Zingiber officinale* roscoe) extract could upregulate the renal expression of NRF2 and TNF $\alpha$  and prevents ethanol-induced toxicity in rat kidney. *Avicenna journal of phytomedicine*, 11(2), 134–145
- Fuhrman, B., Rosenblat, M., Hayek, T., Coleman, R., & Aviram, M. (2000). Ginger extract consumption reduces plasma cholesterol, inhibits LDL oxidation and attenuates development of atherosclerosis in atherosclerotic, apolipoprotein E-deficient mice. *The Journal of nutrition*, 130(5), 1124–1131. <https://doi.org/10.1093/jn/130.5.1124>
- Fumeron, F., Lamri, A., Abi Khalil, C., Jaziri, R., Porchay-Baldérelli, I., Lantieri, O., Vol, S., Balkau, B., Marre, M., & Data from the Epidemiological Study on the Insulin Resistance Syndrome (DESIR) Study Group (2011). Dairy consumption and the incidence of hyperglycemia and the metabolic syndrome: results from a french prospective study, Data from the Epidemiological Study on the Insulin Resistance Syndrome (DESIR). *Diabetes care*, 34(4), 813–817. <https://doi.org/10.2337/dc10-1772>
- Gao, H., Guan, T., Li, C., Zuo, G., Yamahara, J., Wang, J., & Li, Y. (2012). Treatment with ginger ameliorates fructose-induced Fatty liver and hypertriglyceridemia in rats: modulation of the hepatic carbohydrate response element-binding protein-mediated pathway. *Evidence-based complementary and alternative medicine: eCAM*, 2012, 570948. <https://doi.org/10.1155/2012/570948>
- Gao, Y., Ozel, M. Z., Dugmore, T., Sulaeman, A., & Matharu, A. S. (2021). A biorefinery strategy for spent industrial ginger waste. *Journal of hazardous materials*, 401, 123400. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123400>
- Ghayur, M. N., & Gilani, A. H. (2005). Ginger lowers blood pressure through blockade of voltage-dependent calcium channels. *Journal of cardiovascular pharmacology*, 45(1), 74–80. <https://doi.org/10.1097/00005344-200501000-00013>
- Giuliani, C., Napolitano, G., Bucci, I., Montani, V., & Monaco, F. (2001). Il fattore di trascrizione NF-kB: ruolo nella patogenesi delle malattie infiammatorie, autoimmuni, neoplastiche e implicazioni terapeutiche [Nf-kB transcription factor: role in the pathogenesis of inflammatory, autoimmune, and neoplastic diseases and therapy implications]. *La Clinica terapeutica*, 152(4), 249–253
- Grassi, D., Desideri, G., & Ferri, C. (2010). Flavonoids: antioxidants against atherosclerosis. *Nutrients*, 2(8), 889–902. <https://doi.org/10.3390/nu2080889>
- Gumbarewicz, E., Jarzab, A., Stepulak, A., & Kukula-Koch, W. (2022). *Zingiber officinale* Rosc. in the Treatment of Metabolic Syndrome Disorders – A Review of *In Vivo* Studies. *International journal of molecular sciences*, 23(24), 15545. <https://doi.org/10.3390/ijms232415545>
- Hales, C. M., Carroll, M. D., Fryar, C. D., & Ogden, C. L. (2020). Prevalence of Obesity and Severe Obesity Among Adults: United States, 2017-2018. *NCHS data brief*, (360), 1–8
- Halpern, A., Mancini, M. C., Magalhães, M. E., Fisberg, M., Radominski, R., Bertolami, M. C., Bertolami, A., de Melo, M. E., Zanella, M. T., Queiroz, M. S., & Nery, M. (2010). Metabolic syndrome, dyslipidemia, hypertension and type 2 diabetes in youth: from diagnosis to treatment. *Diabetology & metabolic syndrome*, 2, 55. <https://doi.org/10.1186/1758-5996-2-55>



- Hamid, A., Ibrahim, F. W., Ming, T. H., Nasrom, M. N., Eusoff, N., Husain, K., & Abdul Latif, M. (2018). *Zingiber zerumbet* L. (Smith) extract alleviates the ethanol-induced brain damage *via* its antioxidant activity. *BMC complementary and alternative medicine*, 18(1), 101. <https://doi.org/10.1186/s12906-018-2161-5>
- Hasani, H., Arab, A., Hadi, A., Pourmasoumi, M., Ghavami, A., & Miraghajani, M. (2019). Does ginger supplementation lower blood pressure? A systematic review and meta-analysis of clinical trials. *Phytotherapy research: PTR*, 33(6), 1639–1647. <https://doi.org/10.1002/ptr.6362>
- Hashem, R. M., Rashed, L. A., Hassanin, K. M. A., Hetta, M. H., & Ahmed, A. O. (2017). Effect of 6-gingerol on AMPK- NF- $\kappa$ B axis in high fat diet fed rats. *Biomedicine & pharmacotherapy = Biomedecine & pharmacotherapie*, 88, 293–301. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2017.01.035>
- Huang, F. Y., Deng, T., Meng, L. X., & Ma, X. L. (2019). Dietary ginger as a traditional therapy for blood sugar control in patients with type 2 diabetes mellitus: A systematic review and meta-analysis. *Medicine*, 98(13), e15054. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000015054>
- Imani, H., Tabibi, H., Najafi, I., Atabak, S., Hedayati, M., & Rahmani, L. (2015). Effects of ginger on serum glucose, advanced glycation end products, and inflammation in peritoneal dialysis patients. *Nutrition (Burbank, Los Angeles County, Calif.)*, 31(5), 703–707. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2014.11.020>
- Ippoushi, K., Azuma, K., Ito, H., Horie, H., & Higashio, H. (2003). [6]-Gingerol inhibits nitric oxide synthesis in activated J774.1 mouse macrophages and prevents peroxynitrite-induced oxidation and nitration reactions. *Life sciences*, 73(26), 3427–3437. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2003.06.022>
- Isa, Y., Miyakawa, Y., Yanagisawa, M., Goto, T., Kang, M. S., Kawada, T., Morimitsu, Y., Kubota, K., & Tsuda, T. (2008). 6-Shogaol and 6-gingerol, the pungent of ginger, inhibit TNF-alpha mediated downregulation of adiponectin expression via different mechanisms in 3T3-L1 adipocytes. *Biochemical and biophysical research communications*, 373(3), 429–434. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2008.06.046>
- Jafri, S.A., Abass, S., & Qasim, M. (2010). Hypoglycemic Effect of Ginger (*Zingiber Officinale*) in Alloxan Induced Diabetic Rats (*Rattus Norvegicus*). *Pakistan Veterinary Journal*, 31(2), 160–162
- Jo, S. H., Cho, C. Y., Lee, J. Y., Ha, K. S., Kwon, Y. I., & Apostolidis, E. (2016). *In vitro* and *in vivo* reduction of post-prandial blood glucose levels by ethyl alcohol and water *Zingiber mioga* extracts through the inhibition of carbohydrate hydrolyzing enzymes. *BMC complementary and alternative medicine*, 16, 111. <https://doi.org/10.1186/s12906-016-1090-4>
- Karimi, N., Dabidi Roshan, V., & Fathi Bayatiani, Z. (2015). Individually and Combined Water-Based Exercise With Ginger Supplement, on Systemic Inflammation and Metabolic Syndrome Indices, Among the Obese Women With Breast Neoplasms. *Iranian journal of cancer prevention*, 8(6), e3856. <https://doi.org/10.17795/ijcp-3856>
- Kazeem, M. I., Akanji, M. A., Yakubu, M. T., & Ashafa, A. O. (2013). Protective Effect of Free and Bound Polyphenol Extracts from Ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) on the Hepatic Antioxidant and Some Carbohydrate Metabolizing Enzymes of Streptozotocin-Induced Diabetic Rats. *Evidence-based complementary and alternative medicine: eCAM*, 2013, 935486. <https://doi.org/10.1155/2013/935486>
- Khandouzi, N., Shidfar, F., Rajab, A., Rahideh, T., Hosseini, P., & Mir Taheri, M. (2015). The effects of ginger on fasting blood sugar, hemoglobin a1c, apolipoprotein B, apolipoprotein a-I and malondialdehyde in type 2 diabetic patients. *Iranian journal of pharmaceutical research: IJPR*, 14(1), 131–140
- Kim, H. G., Lim, S., Hong, J., Kim, A. J., & Oh, M. S. (2016). Effects of Myoga on Memory and Synaptic Plasticity by Regulating Nerve Growth Factor-Mediated Signaling. *Phytotherapy research: PTR*, 30(2), 208–213. <https://doi.org/10.1002/ptr.5511>
- Kim, H.S., & Kang, S.A. (2017). Study of Quality Characteristics of Kimchi Added with Yangha (*Zingiber mioga* Rosc). *J. Korea Acad.-Ind. Coop. Soc.*, 18, 400–407



- Kim, S., Lee, M. S., Jung, S., Son, H. Y., Park, S., Kang, B., Kim, S. Y., Kim, I. H., Kim, C. T., & Kim, Y. (2018). Ginger Extract Ameliorates Obesity and Inflammation *via* Regulating MicroRNA-21/132 Expression and AMPK Activation in White Adipose Tissue. *Nutrients*, *10*(11), 1567. <https://doi.org/10.3390/nu10111567>
- Kiyama, R. (2020). Nutritional implications of ginger: chemistry, biological activities and signaling pathways. *The Journal of nutritional biochemistry*, *86*, 108486. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2020.108486>
- Kleinert, M., Clemmensen, C., Hofmann, S. M., Moore, M. C., Renner, S., Woods, S. C., Huypens, P., Beckers, J., de Angelis, M. H., Schürmann, A., Bakhti, M., Klingenspor, M., Heiman, M., Cherrington, A. D., Ristow, M., Lickert, H., Wolf, E., Havel, P. J., Müller, T. D., & Tschöp, M. H. (2018). Animal models of obesity and diabetes mellitus. *Nature reviews. Endocrinology*, *14*(3), 140–162. <https://doi.org/10.1038/nrendo.2017.161>
- Kota, N., Panpatil, V. V., Kaleb, R., Varanasi, B., & Polasa, K. (2012). Dose-dependent effect in the inhibition of oxidative stress and anticlastogenic potential of ginger in STZ induced diabetic rats. *Food chemistry*, *135*(4), 2954–2959. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.06.116>
- Lai, Y. S., Lee, W. C., Lin, Y. E., Ho, C. T., Lu, K. H., Lin, S. H., Panyod, S., Chu, Y. L., & Sheen, L. Y. (2016). Ginger Essential Oil Ameliorates Hepatic Injury and Lipid Accumulation in High Fat Diet-Induced Nonalcoholic Fatty Liver Disease. *Journal of agricultural and food chemistry*, *64*(10), 2062–2071. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b06159>
- Laslett, L. J., Alagona, P., Jr, Clark, B. A., 3rd, Drozda, J. P., Jr, Saldivar, F., Wilson, S. R., Poe, C., & Hart, M. (2012). The worldwide environment of cardiovascular disease: prevalence, diagnosis, therapy, and policy issues: a report from the American College of Cardiology. *Journal of the American College of Cardiology*, *60*(25 Suppl), S1–S49. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2012.11.002>
- Lee, D. H., Ahn, J., Jang, Y. J., Ha, T. Y., & Jung, C. H. (2016). *Zingiber mioga* reduces weight gain, insulin resistance and hepatic gluconeogenesis in diet-induced obese mice. *Experimental and therapeutic medicine*, *12*(1), 369–376. <https://doi.org/10.3892/etm.2016.3331>
- Lee, H. Y., Park, S. H., Lee, M., Kim, H. J., Ryu, S. Y., Kim, N. D., Hwang, B. Y., Hong, J. T., Han, S. B., & Kim, Y. (2012). 1-Dehydro-[10]-gingerdione from ginger inhibits IKK $\beta$  activity for NF- $\kappa$ B activation and suppresses NF- $\kappa$ B-regulated expression of inflammatory genes. *British journal of pharmacology*, *167*(1), 128–140. <https://doi.org/10.1111/j.1476-5381.2012.01980.x>
- Lee, J. O., Kim, N., Lee, H. J., Moon, J. W., Lee, S. K., Kim, S. J., Kim, J. K., Park, S. H., & Kim, H. S. (2015). [6]-Gingerol Affects Glucose Metabolism by Dual Regulation via the AMPK $\alpha$ 2-Mediated AS160-Rab5 Pathway and AMPK-Mediated Insulin Sensitizing Effects. *Journal of cellular biochemistry*, *116*(7), 1401–1410. <https://doi.org/10.1002/jcb.25100>
- Lee, T. Y., Lee, K. C., Chen, S. Y., & Chang, H. H. (2009). 6-Gingerol inhibits ROS and iNOS through the suppression of PKC-alpha and NF-kappaB pathways in lipopolysaccharide-stimulated mouse macrophages. *Biochemical and biophysical research communications*, *382*(1), 134–139. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2009.02.160>
- Lei, L., Liu, Y., Wang, X., Jiao, R., Ma, K. Y., Li, Y. M., Wang, L., Man, S. W., Sang, S., Huang, Y., & Chen, Z. Y. (2014). Plasma cholesterol-lowering activity of gingerol- and shogaol-enriched extract is mediated by increasing sterol excretion. *Journal of agricultural and food chemistry*, *62*(43), 10515–10521. <https://doi.org/10.1021/jf5043344>
- Lemieux, I., & Després, J. P. (2020). Metabolic Syndrome: Past, Present and Future. *Nutrients*, *12*(11), 3501. <https://doi.org/10.3390/nu12113501>

- Li, C., & Zhou, L. (2015). Inhibitory effect 6-gingerol on adipogenesis through activation of the Wnt/ $\beta$ -catenin signaling pathway in 3T3-L1 adipocytes. *Toxicology in vitro: an international journal published in association with BIBRA*, 30(1 Pt B), 394–401. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2015.09.023>
- Li, X. H., McGrath, K. C., Tran, V. H., Li, Y. M., Duke, C. C., Roufogalis, B. D., & Heather, A. K. (2013). Attenuation of Proinflammatory Responses by S-[6]-Gingerol via Inhibition of ROS/NF-Kappa B/COX2 Activation in HuH7 Cells. *Evidence-based complementary and alternative medicine: eCAM*, 2013, 146142. <https://doi.org/10.1155/2013/146142>
- Li, Y., Tran, V. H., Duke, C. C., & Roufogalis, B. D. (2012a). Gingerols of *Zingiber officinale* enhance glucose uptake by increasing cell surface GLUT4 in cultured L6 myotubes. *Planta medica*, 78(14), 1549–1555. <https://doi.org/10.1055/s-0032-1315041>
- Li, Y., Tran, V. H., Duke, C. C., & Roufogalis, B. D. (2012b). Preventive and Protective Properties of *Zingiber officinale* (Ginger) in Diabetes Mellitus, Diabetic Complications, and Associated Lipid and Other Metabolic Disorders: A Brief Review. *Evidence-based complementary and alternative medicine: eCAM*, 2012, 516870. <https://doi.org/10.1155/2012/516870>
- Li, Y., Tran, V. H., Kota, B. P., Nammi, S., Duke, C. C., & Roufogalis, B. D. (2014). Preventative effect of *Zingiber officinale* on insulin resistance in a high-fat high-carbohydrate diet-fed rat model and its mechanism of action. *Basic & clinical pharmacology & toxicology*, 115(2), 209–215. <https://doi.org/10.1111/bcpt.12196>
- Libby, P., Buring, J. E., Badimon, L., Hansson, G. K., Deanfield, J., Bittencourt, M. S., Tokgözoğlu, L., & Lewis, E. F. (2019). Atherosclerosis. *Nature reviews. Disease primers*, 5(1), 56. <https://doi.org/10.1038/s41572-019-0106-z>
- Liu, G. S., Chan, E. C., Higuchi, M., Dusting, G. J., & Jiang, F. (2012). Redox mechanisms in regulation of adipocyte differentiation: beyond a general stress response. *Cells*, 1(4), 976–993. <https://doi.org/10.3390/cells1040976>
- Lusis, A. J. (2000). Atherosclerosis. *Nature*, 407(6801), 233–241. <https://doi.org/10.1038/35025203>
- Mahluji, S., Attari, V. E., Mobasser, M., Payahoo, L., Ostadrahimi, A., & Golzari, S. E. (2013a). Effects of ginger (*Zingiber officinale*) on plasma glucose level, HbA1c and insulin sensitivity in type 2 diabetic patients. *International journal of food sciences and nutrition*, 64(6), 682–686. <https://doi.org/10.3109/09637486.2013.775223>
- Mahluji, S., Ostadrahimi, A., Mobasser, M., Ebrahimzade Attari, V., & Payahoo, L. (2013b). Anti-inflammatory effects of *Zingiber officinale* in type 2 diabetic patients. *Advanced pharmaceutical bulletin*, 3(2), 273–276. <https://doi.org/10.5681/apb.2013.044>
- Mahmoud, M. F., Diaai, A. A., & Ahmed, F. (2012). Evaluation of the efficacy of ginger, Arabic gum, and *Boswellia* in acute and chronic renal failure. *Renal failure*, 34(1), 73–82. <https://doi.org/10.3109/0886022X.2011.623563>
- Mahmoud, R. H., & Elnour, W. A. (2013). Comparative evaluation of the efficacy of ginger and orlistat on obesity management, pancreatic lipase and liver peroxisomal catalase enzyme in male albino rats. *European review for medical and pharmacological sciences*, 17(1), 75–83
- Mansour, M. S., Ni, Y. M., Roberts, A. L., Kelleman, M., Roychoudhury, A., & St-Onge, M. P. (2012). Ginger consumption enhances the thermic effect of food and promotes feelings of satiety without affecting metabolic and hormonal parameters in overweight men: a pilot study. *Metabolism: clinical and experimental*, 61(10), 1347–1352. <https://doi.org/10.1016/j.metabol.2012.03.016>

- Mao, Q. Q., Xu, X. Y., Cao, S. Y., Gan, R. Y., Corke, H., Beta, T., & Li, H. B. (2019). Bioactive Compounds and Bioactivities of Ginger (*Zingiber officinale* Roscoe). *Foods (Basel, Switzerland)*, 8(6), 185. <https://doi.org/10.3390/foods8060185>
- Masuda, Y., Kikuzaki, H., Hisamoto, M., & Nakatani, N. (2004). Antioxidant properties of gingerol related compounds from ginger. *BioFactors (Oxford, England)*, 21(1-4), 293–296. <https://doi.org/10.1002/biof.552210157>
- Matsuda, A., Wang, Z., Takahashi, S., Tokuda, T., Miura, N., & Hasegawa, J. (2009). Upregulation of mRNA of retinoid binding protein and fatty acid binding protein by cholesterol enriched-diet and effect of ginger on lipid metabolism. *Life sciences*, 84(25-26), 903–907. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2009.04.004>
- Mîinea, C. P., Sano, H., Kane, S., Sano, E., Fukuda, M., Peränen, J., Lane, W. S., & Lienhard, G. E. (2005). AS160, the Akt substrate regulating GLUT4 translocation, has a functional Rab GTPase-activating protein domain. *The Biochemical journal*, 391(Pt 1), 87–93. <https://doi.org/10.1042/BJ20050887>
- Mikhail, N. (2009). The metabolic syndrome: insulin resistance. *Current hypertension reports*, 11(2), 156–158. <https://doi.org/10.1007/s11906-009-0027-4>
- Misawa, K., Hashizume, K., Yamamoto, M., Minegishi, Y., Hase, T., & Shimotoyodome, A. (2015). Ginger extract prevents high-fat diet-induced obesity in mice via activation of the peroxisome proliferator-activated receptor  $\delta$  pathway. *The Journal of nutritional biochemistry*, 26(10), 1058–1067. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2015.04.014>
- Mozaffari-Khosravi, H., Talaei, B., Jalali, B. A., Najarzadeh, A., & Mozayan, M. R. (2014). The effect of ginger powder supplementation on insulin resistance and glycemic indices in patients with type 2 diabetes: a randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *Complementary therapies in medicine*, 22(1), 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2013.12.017>
- Mukkavilli, R., Yang, C., Tanwar, R. S., Saxena, R., Gundala, S. R., Zhang, Y., Ghareeb, A., Floyd, S. D., Vangala, S., Kuo, W. W., Rida, P. C. G., & Aneja, R. (2018). Pharmacokinetic-pharmacodynamic correlations in the development of ginger extract as an anticancer agent. *Scientific reports*, 8(1), 3056. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21125-2>
- Murugesan, S., Venkateswaran, M.R., Jayabal, S., & Periyasamy, S. (2020). Evaluation of the antioxidant and anti-arthritis potential of *Zingiber officinale* Rosc. by *in vitro* and *in silico* analysis. *South African Journal of Botany*, 130, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.12.019>
- Mustafa, I., Chin, N. L., Fakurazi, S., & Palanisamy, A. (2019). Comparison of Phytochemicals, Antioxidant and Anti-Inflammatory Properties of Sun-, Oven- and Freeze-Dried Ginger Extracts. *Foods (Basel, Switzerland)*, 8(10), 456. <https://doi.org/10.3390/foods8100456>
- Nammi, S., Sreemantula, S., & Roufogalis, B. D. (2009). Protective effects of ethanolic extract of *Zingiber officinale* rhizome on the development of metabolic syndrome in high-fat diet-fed rats. *Basic & clinical pharmacology & toxicology*, 104(5), 366–373. <https://doi.org/10.1111/j.1742-7843.2008.00362.x>
- Okamoto, M., Irii, H., Tahara, Y., Ishii, H., Hirao, A., Udagawa, H., Hiramoto, M., Yasuda, K., Takanishi, A., Shibata, S., & Shimizu, I. (2011). Synthesis of a new [6]-gingerol analogue and its protective effect with respect to the development of metabolic syndrome in mice fed a high-fat diet. *Journal of medicinal chemistry*, 54(18), 6295–6304. <https://doi.org/10.1021/jm200662c>
- Ozkur, M., Benlier, N., Takan, I., Vasileiou, C., Georgakilas, A. G., Pavlopoulou, A., Cetin, Z., & Saygili, E. I. (2022). Ginger for Healthy Ageing: A Systematic Review on Current Evidence of Its Antioxidant,

- Anti-Inflammatory, and Anticancer Properties. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 2022, 4748447. <https://doi.org/10.1155/2022/4748447>
- Parham, S., Kharazi, A. Z., Bakhsheshi-Rad, H. R., Nur, H., Ismail, A. F., Sharif, S., RamaKrishna, S., & Berto, F. (2020). Antioxidant, Antimicrobial and Antiviral Properties of Herbal Materials. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, 9(12), 1309. <https://doi.org/10.3390/antiox9121309>
- Perreault, M., Erbe, D. V., & Tobin, J. F. (2008). PPARdelta Agonism for the Treatment of Obesity and Associated Disorders: Challenges and Opportunities. *PPAR research*, 2008, 125387. <https://doi.org/10.1155/2008/125387>
- Pulbutr, P., Thunchomnang, K., Lawa, K., Mangkhalathon, A., & Saenubol, P. (2011). Lipolytic effects of Zingerone in adipocytes isolated from normal diet-fed rats and high fat diet-fed rats. *International Journal of Pharmacology*, 7, 629-634
- Rahimlou, M., Yari, Z., Hekmatdoost, A., Alavian, S. M., & Keshavarz, S. A. (2016). Ginger Supplementation in Nonalcoholic Fatty Liver Disease: A Randomized, Double-Blind, Placebo-Controlled Pilot Study. *Hepatitis monthly*, 16(1), e34897. <https://doi.org/10.5812/hepatmon.34897>
- Rameshrad, M., Razavi, B. M., Lalau, J. D., De Broe, M. E., & Hosseinzadeh, H. (2020). An overview of glucagon-like peptide-1 receptor agonists for the treatment of metabolic syndrome: A drug repositioning. *Iranian journal of basic medical sciences*, 23(5), 556–568. <https://doi.org/10.22038/ijbms.2020.41638.9832>
- Rani, M. P., Krishna, M. S., Padmakumari, K. P., Raghu, K. G., & Sundaresan, A. (2012). Zingiber officinale extract exhibits antidiabetic potential via modulating glucose uptake, protein glycation and inhibiting adipocyte differentiation: an in vitro study. *Journal of the science of food and agriculture*, 92(9), 1948–1955. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5567>
- Rani, M. P., Padmakumari, K. P., Sankarikutty, B., Cherian, O. L., Nisha, V. M., & Raghu, K. G. (2011). Inhibitory potential of ginger extracts against enzymes linked to type 2 diabetes, inflammation and induced oxidative stress. *International journal of food sciences and nutrition*, 62(2), 106–110. <https://doi.org/10.3109/09637486.2010.515565>
- Razali, N., Dewa, A., Asmawi, M. Z., Mohamed, N., & Manshor, N. M. (2020). Mechanisms underlying the vascular relaxation activities of *Zingiber officinale* var. *rubrum* in thoracic aorta of spontaneously hypertensive rats. *Journal of integrative medicine*, 18(1), 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.joim.2019.12.003>
- Rehman, M. U., Rashid, S. M., Rasool, S., Shakeel, S., Ahmad, B., Ahmad, S. B., Madkhali, H., Ganaie, M. A., Majid, S., & Bhat, S. A. (2019). Zingerone (4-(4-hydroxy-3-methylphenyl) butan-2-one) ameliorates renal function via controlling oxidative burst and inflammation in experimental diabetic nephropathy. *Archives of physiology and biochemistry*, 125(3), 201–209. <https://doi.org/10.1080/13813455.2018.1448422>
- Roudsari, N. M., Lashgari, N. A., Momtaz, S., Roufogalis, B., Abdolghaffari, A. H., & Sahebkar, A. (2021). Ginger: A complementary approach for management of cardiovascular diseases. *BioFactors (Oxford, England)*, 47(6), 933–951. <https://doi.org/10.1002/biof.1777>
- Ruiz-Ortega, M., Rayego-Mateos, S., Lamas, S., Ortiz, A., & Rodrigues-Diez, R. R. (2020). Targeting the progression of chronic kidney disease. *Nature reviews. Nephrology*, 16(5), 269–288. <https://doi.org/10.1038/s41581-019-0248-y>
- Ryan, J. L., & Morrow, G. R. (2010). Ginger. *Oncology nurse edition*, 24(2), 46–49



- Salaramoli, S., Mehri, S., Yarmohammadi, F., Hashemy, S. I., & Hosseinzadeh, H. (2022). The effects of ginger and its constituents in the prevention of metabolic syndrome: A review. *Iranian journal of basic medical sciences*, 25(6), 664–674. <https://doi.org/10.22038/IJBMS.2022.59627.13231>
- Samad, M. B., Mohsin, M. N. A. B., Razu, B. A., Hossain, M. T., Mahzabeen, S., Unnoor, N., Muna, I. A., Akhter, F., Kabir, A. U., & Hannan, J. M. A. (2017). [6]-Gingerol, from *Zingiber officinale*, potentiates GLP-1 mediated glucose-stimulated insulin secretion pathway in pancreatic  $\beta$ -cells and increases RAB8/RAB10-regulated membrane presentation of GLUT4 transporters in skeletal muscle to improve hyperglycemia in Leprdb/db type 2 diabetic mice. *BMC complementary and alternative medicine*, 17(1), 395. <https://doi.org/10.1186/s12906-017-1903-0>
- Saravanan, G., Ponmurugan, P., Deepa, M. A., & Senthilkumar, B. (2014). Anti-obesity action of gingerol: effect on lipid profile, insulin, leptin, amylase and lipase in male obese rats induced by a high-fat diet. *Journal of the science of food and agriculture*, 94(14), 2972–2977. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6642>
- Schillaci, G., Pirro, M., Vaudo, G., Gemelli, F., Marchesi, S., Porcellati, C., & Mannarino, E. (2004). Prognostic value of the metabolic syndrome in essential hypertension. *Journal of the American College of Cardiology*, 43(10), 1817–1822. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2003.12.049>
- Sekiya, K., Ohtani, A., & Kusano, S. (2004). Enhancement of insulin sensitivity in adipocytes by ginger. *BioFactors (Oxford, England)*, 22(1-4), 153–156. <https://doi.org/10.1002/biof.5520220130>
- Semwal, R. B., Semwal, D. K., Combrinck, S., & Viljoen, A. M. (2015). Gingerols and shogaols: Important nutraceutical principles from ginger. *Phytochemistry*, 117, 554–568. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2015.07.012>
- Shin, D. S., & Eom, Y. B. (2019). Zerumbone inhibits *Candida albicans* biofilm formation and hyphal growth. *Canadian journal of microbiology*, 65(10), 713–721. <https://doi.org/10.1139/cjm-2019-0155>
- Shin, N. R., Shin, I. S., Jeon, C. M., Hong, J. M., Kwon, O. K., Kim, H. S., Oh, S. R., Hahn, K. W., & Ahn, K. S. (2015). *Zingiber mioga* (Thunb.) Roscoe attenuates allergic asthma induced by ovalbumin challenge. *Molecular medicine reports*, 12(3), 4538–4545. <https://doi.org/10.3892/mmr.2015.3914>
- Son, M. J., Miura, Y., & Yagasaki, K. (2015). Mechanisms for antidiabetic effect of gingerol in cultured cells and obese diabetic model mice. *Cytotechnology*, 67(4), 641–652. <https://doi.org/10.1007/s10616-014-9730-3>
- Srinivasan, K. (2017). Ginger rhizomes (*Zingiber officinale*): a spice with multiple health beneficial potentials. *PharmaNutrition*, 5(1), 18-28. <https://doi.org/10.1016/j.phanu.2017.01.001>
- Sugimoto, K., Takeuchi, H., Nakagawa, K., & Matsuoka, Y. (2018). Hyperthermic Effect of Ginger (*Zingiber officinale*) Extract-Containing Beverage on Peripheral Skin Surface Temperature in Women. *Evidence-based complementary and alternative medicine: eCAM*, 2018, 3207623. <https://doi.org/10.1155/2018/3207623>
- Suk, S., Kwon, G. T., Lee, E., Jang, W. J., Yang, H., Kim, J. H., Thimmegowda, N. R., Chung, M. Y., Kwon, J. Y., Yang, S., Kim, J. K., Park, J. H. Y., & Lee, K. W. (2017). Gingerenone A, a polyphenol present in ginger, suppresses obesity and adipose tissue inflammation in high-fat diet-fed mice. *Molecular nutrition & food research*, 61(10), 10.1002/mnfr.201700139. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201700139>
- Suk, S., Seo, S.G., Yu, J.G., Yang, H., Jeong, E., Jang, Y.J., Yaghmoor, S.S., Ahmed, Y., Yousef, J.M., Abualnaja, K.O., Al-Malki, A.L., Kumosani, T.A., Lee, C.Y., Lee, H.J., & Lee, K.W. (2016). A bioactive constituent of ginger, 6-shogaol, prevents adipogenesis and stimulates lipolysis in 3T3-L1 adipocytes. *Journal of Food Biochemistry*, 40(1), 84–90. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12191>



- Sun, F.J., Li, Z.L., Qian, S.H., & Pu, S.B. (2015). Research Advances on the *Zingiberis Rhizoma*. *Chin. Wild Plant Resour.* 34, 34–37. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9690.2015.03.009>
- Tabibi, H., Imani, H., Atabak, S., Najafi, I., Hedayati, M., & Rahmani, L. (2016). Effects of Ginger on Serum Lipids and Lipoproteins in Peritoneal Dialysis Patients: A Randomized Controlled Trial. *Peritoneal dialysis international: journal of the International Society for Peritoneal Dialysis*, 36(2), 140–145. <https://doi.org/10.3747/pdi.2015.00006>
- Tan, J. W., Israf, D. A., & Tham, C. L. (2018). Major Bioactive Compounds in Essential Oils Extracted From the Rhizomes of *Zingiber zerumbet* (L) Smith: A Mini-Review on the Anti-allergic and Immunomodulatory Properties. *Frontiers in pharmacology*, 9, 652. <https://doi.org/10.3389/fphar.2018.00652>
- Tripathi, S., Maier, K. G., Bruch, D., & Kittur, D. S. (2007). Effect of 6-gingerol on pro-inflammatory cytokine production and costimulatory molecule expression in murine peritoneal macrophages. *The Journal of surgical research*, 138(2), 209–213. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2006.07.051>
- Tung, B. T., Thu, D. K., Thu, N. T. K., & Hai, N. T. (2017). Antioxidant and acetylcholinesterase inhibitory activities of ginger root (*Zingiber officinale* Roscoe) extract. *Journal of complementary & integrative medicine*, 14(4), /j/jcim.2017.14.issue-4/jcim-2016-0116/jcim-2016-0116.xml. <https://doi.org/10.1515/jcim-2016-0116>
- Tzeng, T. F., & Liu, I. M. (2013). 6-gingerol prevents adipogenesis and the accumulation of cytoplasmic lipid droplets in 3T3-L1 cells. *Phytomedicine: international journal of phytotherapy and phytopharmacology*, 20(6), 481–487. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2012.12.006>
- Tzeng, T. F., Liou, S. S., Chang, C. J., & Liu, I. M. (2015a). [6]-gingerol dampens hepatic steatosis and inflammation in experimental nonalcoholic steatohepatitis. *Phytomedicine: international journal of phytotherapy and phytopharmacology*, 22(4), 452–461. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2015.01.015>
- Tzeng, T. F., Liou, S. S., Chang, C. J., & Liu, I. M. (2015b). 6-gingerol protects against nutritional steatohepatitis by regulating key genes related to inflammation and lipid metabolism. *Nutrients*, 7(2), 999–1020. <https://doi.org/10.3390/nu7020999>
- Venkateswaran, M., Jayabal, S., Hemaiswarya, S., Murugesan, S., Enkateswara, S., Doble, M., & Periyasamy, S. (2021). Polyphenol-rich Indian ginger cultivars ameliorate GLUT4 activity in C2C12 cells, inhibit diabetes-related enzymes and LPS-induced inflammation: An *in vitro* study. *Journal of food biochemistry*, 45(2), e13600. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13600>
- Wang, D., Uhrin, P., Mocan, A., Waltenberger, B., Breuss, J. M., Tewari, D., Mihaly-Bison, J., Huminiecki, Ł., Starzyński, R. R., Tzvetkov, N. T., Horbańczuk, J., & Atanasov, A. G. (2018). Vascular smooth muscle cell proliferation as a therapeutic target. Part 1: molecular targets and pathways. *Biotechnology advances*, 36(6), 1586–1607. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.04.006>
- Wang, D., Yang, Y., Lei, Y., Tzvetkov, N. T., Liu, X., Yeung, A. W. K., Xu, S., & Atanasov, A. G. (2019). Targeting Foam Cell Formation in Atherosclerosis: Therapeutic Potential of Natural Products. *Pharmacological reviews*, 71(4), 596–670. <https://doi.org/10.1124/pr.118.017178>
- Wang, J., Gao, H., Ke, D., Zuo, G., Yang, Y., Yamahara, J., & Li, Y. (2013). Improvement of liquid fructose-induced adipose tissue insulin resistance by ginger treatment in rats is associated with suppression of adipose macrophage-related proinflammatory cytokines. *Evidence-based complementary and alternative medicine: eCAM*, 2013, 590376. <https://doi.org/10.1155/2013/590376>
- Wang, J., Ke, W., Bao, R., Hu, X., & Chen, F. (2017). Beneficial effects of ginger *Zingiber officinale* Roscoe on obesity and metabolic syndrome: a review. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1398(1), 83–98. <https://doi.org/10.1111/nyas.13375>

- Wang, J., Wang, P., Li, D., Hu, X., & Chen, F. (2020). Beneficial effects of ginger on prevention of obesity through modulation of gut microbiota in mice. *European journal of nutrition*, 59(2), 699–718. <https://doi.org/10.1007/s00394-019-01938-1>
- Wang, Y. K., Hong, Y. J., Yao, Y. H., Huang, X. M., Liu, X. B., Zhang, C. Y., Zhang, L., & Xu, X. L. (2013). 6-Shogaol Protects against Oxidized LDL-Induced Endothelial Injuries by Inhibiting Oxidized LDL-Evoked LOX-1 Signaling. *Evidence-based complementary and alternative medicine: eCAM*, 2013, 503521. <https://doi.org/10.1155/2013/503521>
- Wang, Y., Yu, H., Zhang, X., Feng, Q., Guo, X., Li, S., Li, R., Chu, D., & Ma, Y. (2017). Evaluation of daily ginger consumption for the prevention of chronic diseases in adults: A cross-sectional study. *Nutrition (Burbank, Los Angeles County, Calif.)*, 36, 79–84. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2016.05.009>
- Webster, A. C., Nagler, E. V., Morton, R. L., & Masson, P. (2017). Chronic Kidney Disease. *Lancet (London, England)*, 389(10075), 1238–1252. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(16\)32064-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)32064-5)
- Wen, J., Zhang, L., Wang, J., Wang, J., Wang, L., Wang, R., Li, R., Liu, H., Wei, S., Li, H., Zou, W., & Zhao, Y. (2020). Therapeutic effects of higenamine combined with [6]-gingerol on chronic heart failure induced by doxorubicin via ameliorating mitochondrial function. *Journal of cellular and molecular medicine*, 24(7), 4036–4050. <https://doi.org/10.1111/jcmm.15041>
- Wu, H. C., Horng, C. T., Tsai, S. C., Lee, Y. L., Hsu, S. C., Tsai, Y. J., Tsai, F. J., Chiang, J. H., Kuo, D. H., & Yang, J. S. (2018). Relaxant and vasoprotective effects of ginger extracts on porcine coronary arteries. *International journal of molecular medicine*, 41(4), 2420–2428. <https://doi.org/10.3892/ijmm.2018.3380>
- Wu, Q.G., & Liao, J.P. (1995). Anatomy and Histochemistry of the Seeds of *Zingiber boehm*. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 15, 32–39. <https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-4025.1995.01.007>
- Xiang, J.M., Xu, L.J., Xiao, W., & Xiao, P.G. (2017). Research Progress in *Zingiber officinale*. *Chinese Pharmaceutical Journal*, 52, 353–357. <https://doi.org/10.11669/cpj.2017.05.004>
- Xu, T., Tao, M., Li, R., Xu, X., Pan, S., & Wu, T. (2022). Longevity-promoting properties of ginger extract in *Caenorhabditis elegans* via the insulin/IGF-1 signaling pathway. *Food & function*, 13(19), 9893–9903. <https://doi.org/10.1039/d2fo01602h>
- Yang, X., Li, Y., Li, Y., Ren, X., Zhang, X., Hu, D., Gao, Y., Xing, Y., & Shang, H. (2017). Oxidative Stress-Mediated Atherosclerosis: Mechanisms and Therapies. *Frontiers in physiology*, 8, 600. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00600>
- Yob, N. J., Jofry, S. M., Affandi, M. M., Teh, L. K., Salleh, M. Z., & Zakaria, Z. A. (2011). *Zingiber zerumbet* (L.) Smith: A Review of Its Ethnomedicinal, Chemical, and Pharmacological Uses. *Evidence-based complementary and alternative medicine: eCAM*, 2011, 543216. <https://doi.org/10.1155/2011/543216>
- Zhang, M., Zhao, R., Wang, D., Wang, L., Zhang, Q., Wei, S., Lu, F., Peng, W., & Wu, C. (2021). Ginger (*Zingiber officinale* Rosc.) and its bioactive components are potential resources for health beneficial agents. *Phytotherapy research: PTR*, 35(2), 711–742. <https://doi.org/10.1002/ptr.6858>
- Zick, S. M., Djuric, Z., Ruffin, M. T., Litzinger, A. J., Normolle, D. P., Alrawi, S., Feng, M. R., & Brenner, D. E. (2008). Pharmacokinetics of 6-gingerol, 8-gingerol, 10-gingerol, and 6-shogaol and conjugate metabolites in healthy human subjects. *Cancer epidemiology, biomarkers & prevention: a publication of the American Association for Cancer Research, cosponsored by the American Society of Preventive Oncology*, 17(8), 1930–1936. <https://doi.org/10.1158/1055-9965.EPI-07-2934>

**Ви можете цитувати цю статтю так:**

Ткаченко Г., Тюпова Т., Мовчан В., Лукаш О., Кургалюк Н. Фітотерапевтичне застосування імбиру (*Zingiber officinale*). *Biota. Human. Technology*. 2025. №1. С. 94-124.

**Cite this article in APA style as:**

Tkaczenko, H., Tiupova, T., Movchan, V., Lukash, O., & Kurhaluk, N. (2025). Phytotherapeutic use of ginger (*Zingiber officinale*). *Biota. Human. Technology*, 1, P. 94-124. (in Ukrainian)

**Information about the authors:**

**Tkaczenko H.** [*in Ukrainian: Ткаченко Г.*] <sup>1</sup>, 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

**Tiupova T.** [*in Ukrainian: Тюпова Т.*] <sup>2</sup>, student, e-mail: ttyupova@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-0929-8205  
Department of Zoology and Animal Physiology, Institute of Biology and Earth Sciences, Pomeranian University in Słupsk  
22B Arciszewskiego Street, Słupsk, 76-200, Poland

**Movchan V.** [*in Ukrainian: Мовчан В.*] <sup>3</sup>, Assoc. Prof., Ph.D. in Biol. Sc., email: greendragoness16@ukr.net  
ORCID: 0000-0003-2063-2729  
Institute of Biomedical Technologies, Open International University of Human Development "Ukraine"  
23 Lvivska Street, building 2, Kyiv, 03115, Ukraine

**Lukash O.** [*in Ukrainian: Лукаш О.*] <sup>4</sup>, 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

**Kurhaluk N.** [*in Ukrainian: Кургалюк Н.*] <sup>5</sup>, Dr. of Biol. Sc., Prof., email: natalia.kurhaluk@apsl.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

<sup>1</sup> Study design, data collection, manuscript preparation, funds collection.

<sup>2</sup> Study design, manuscript preparation.

<sup>3</sup> Data collection.

<sup>4</sup> Study design, data collection, manuscript preparation, funds collection.

<sup>5</sup> Study design, data collection, manuscript preparation, funds collection.



# **ANTHROPOGENIC TRANSFORMATION OF ECOSYSTEMS**

**АНТРОПОГЕННА ТРАНСФОРМАЦІЯ  
ЕКОСИСТЕМ**





Copyright (c) 2025 Olha Biedunkova, Pavlo Kuznietsov

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/).

Ольга Бедункова, Павло Кузнецов

ДОСЛІДЖЕННЯ ОРГАНІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД РІЧКИ  
У ЗОНІ АНТРОПОГЕННОГО ВПЛИВУ ВОДНОГО СКИДУ

Olha Biedunkova, Pavlo Kuznietsov

STUDY OF ORGANIC POLLUTION OF SURFACE WATERS OF THE RIVER  
IN THE ZONE OF ANTHROPOGENIC IMPACT OF WATER DISCHARGE

## АНОТАЦІЯ

**Мета роботи.** Метою дослідження був аналіз якості води річки Стир за індексами органічного забруднення (ІОЗ). Завдання дослідження включали моніторинг змін концентрацій органічного забруднення за хімічними показниками у воді р. Стир в зоні впливу водного скиду Рівненської атомної електростанції (РАЕС) та розрахунок ІОЗ за різними методиками. Об'єктом дослідження є поверхневі води р. Стир, зокрема їх органічне забруднення за значеннями ІОЗ. Предметом дослідження є варіації ІОЗ та їх динаміка під дією антропогенного впливу водного скиду РАЕС.

**Методологія.** Дослідження охопило період 2020–2022 років та ґрунтувалося на аналізі хімічних показників біохімічного споживання кисню (БСК<sub>5</sub>), хімічного споживання кисню (ХСК), концентрацій нітратів (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), амонійного азоту (N-NH<sub>3</sub>), нітритів (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), ортофосфатів (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) і розчиненого кисню (РК). Для визначення динаміки ІОЗ використовували кілька методик розрахунку, а також статистичний аналіз отриманих даних. Оцінка екологічного стану р. Стир проводилась відповідно до нормативів гранично допустимих концентрацій (ГДК) для водойм рибогосподарського та господарсько-побутового призначення.

**Наукова новизна.** У роботі здійснено комплексний аналіз динаміки органічного забруднення р. Стир у зоні впливу РАЕС, враховуючи різні методики розрахунку ІОЗ. Застосовані підходи дозволяють адаптувати методики дослідження для інших водних об'єктів, що є важливим для покращення екологічного моніторингу.

**Висновки. Результати дослідження** свідчать, що за ІОЗ вода річки Стир переважно відповідає стану «чисті», але спостерігалися окремі періоди перевищення порогових значень. У теплий період зростає органічне забруднення через підвищення ХСК і БСК<sub>5</sub>, тоді як у зимовий сезон домінує накопичення NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, та максимальні концентрації N-NH<sub>3</sub> часто перевищували ГДК рибогосподарського призначення, що свідчить про вплив органічних забруднень.

**Ключові слова:** річка Стир, водний скид, індекс органічного забруднення, антропогенне навантаження

## ABSTRACT

**Objective.** The purpose of the study was to analyze the impact of RNPP water discharges on the water quality of the Styr River by the organic pollution indices (OPI). The objectives of the study included monitoring changes in organic pollution concentrations by the following indicators: biochemical oxygen demand (BOD<sub>5</sub>), chemical oxygen demand (COD), nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), ammonium nitrogen (N-NH<sub>3</sub>), nitrite (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), orthophosphate (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) and dissolved oxygen (DO) concentrations in the water of the Styr River in the zone of influence of the Rivne Nuclear Power Plant (RNPP) water discharge and calculation of the OPI by different methods. The object of the study is the surface waters of the Styr River, in particular, their organic pollution by the values of the OPI. The subject of the study is the variations of the OPI calculated by different methods and their dynamics under the influence of anthropogenic factor of influence of water discharge from the RNPP.

**Methodology.** The study covered the period of 2020–2022 and was based on the analysis of chemical indicators: BOD<sub>5</sub>, COD, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, N-NH<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, and DO. Several calculation methods and statistical analysis of the data were used to determine the dynamics of the OPI. The assessment of the ecological state of the Styr River was carried out in accordance with the standards of maximum allowable concentrations (MAC) for fishery and domestic water bodies.

**Scientific novelty.** The study provides a comprehensive analysis of the dynamics of organic pollution of the Styr River in the RNPP impact zone, taking into account different methods of calculating the OPI. The applied approaches allow us to adapt the research methods for other water bodies, which is important for improving environmental monitoring.



**Conclusions.** The results of the study show that the water of the Styr River mostly corresponds to the 'clean' state according to the OPI, but there were some periods of exceeding the thresholds. In the warm season, organic pollution increases due to an increase in COD and BOD<sub>5</sub>, while in the winter season, the accumulation of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dominates, and the maximum concentrations of N-NH<sub>3</sub> often exceeded the MAC for fisheries, indicating impact of organic pollution.

**Key words:** Styr River, water discharge, organic pollution index, anthropogenic load

### Постановка проблеми

Вода є одним із найважливіших природних ресурсів, життєво необхідним для забезпечення різноманітних потреб, однак якість води значною мірою визначає її придатність для використання, а підтримання нормативів якості є актуальною екологічною та соціальною проблемами. Забруднення поверхневих вод, зокрема органічне, може значно впливати на збалансованість екосистем, що робить моніторинг показників якості води та контроль джерел забруднення пріоритетним завданням. Розвиток органічного забруднення визначають біогенні хімічні елементи азоту, вуглецю, фосфору та кисню та відповідні хімічні показники концентрації біологічне споживання кисню (БСК<sub>5</sub>), хімічне споживання кисню (ХСК), концентрація нітратів (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), амонійного азоту (N-NH<sub>3</sub>), нітрит-іонів (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), фосфатів (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) та розчиненого кисню (РК) (Chen et al., 2023).

Відповідними документами що регулюють вплив водних скидів на навколишнє середовище в Україні є Водний кодекс України (ВКУ) (Water Code of Ukraine, 1995) та Водна рамкова директива (ВДР) (Directive 2000/60/ЕС, 2000). Екологічний стандарт якості (ЕСЯ) є ключовим поняттям ВРД та визначається для окремої речовини, який має значення нормованої концентрації для обмеження негативного впливу на здоров'я людини та довкілля. ВКУ встановлює аналог ЕСЯ – гранично допустиму концентрацію

(ГДК) речовини у воді, за якої визначається придатність води для конкретних цілей водокористування. На поверхневі води річки в межах населеного пункту розповсюджуються ГДК (табл. 1) для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення за Hygienic requirements... (2022), інші ділянки до рибо-господарських потреб за List of maximum permissible concentrations... (1990). Таким чином на різні ділянки річки можуть бути розповсюджені різні екологічні нормативи, тому актуальним є оцінка екологічного стану водойми з використанням різних нормативів.

Попередні дослідження, такі як роботи (Kuznietsov & Biedunkova, 2023; Kuznietsov & Biedunkova, 2024) акцентують на важливості екологічної безпеки у моніторингу водних об'єктів в зоні скидів атомної електростанції (АЕС). Особливу увагу приділено залежності екологічного стану водойм від антропогенних факторів, зокрема водних скидів атомних електростанцій. Індекс органічного забруднення (ІОЗ) визнаний надійним інструментом оцінки стану водних екосистем. У численних роботах (Chen et al., 2023; VishnuRadhan et al., 2017; Makki et al., 2023; Son et al., 2020) було запропоновано різні методології його розрахунку. Щоб зрозуміти ситуацію з якістю води та вплив антропогенної діяльності на погіршення якості води в річці, було проведено дослідження з використанням часових рядів даних про параметри якості води.

Таблиця 1

Значення ГДК для водойм рибогосподарського (F) та господарсько-побутового призначення (H)

Показник	F	H
РК, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	не менше 4,0 в будь-який період року в пробі, відібраній до 12-ї години дня	
БСК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	3,0 <sup>1)</sup>	3,0
ХСК, мгО/дм <sup>3</sup>	50,0 <sup>1)</sup>	30,0
N-NH <sub>3</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	0,5	2,0
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0,08	3,3
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	40,0	45,0
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	2,14 <sup>2)</sup>	3,5

Примітки: <sup>1)</sup> – ВІДПОВІДНО ДО Environmental safety standards..., 2012;

<sup>2)</sup> – ВІДПОВІДНО ДО Guidelines for the development..., 2021

### Матеріали та методи дослідження

Відбір проб води для дослідження проводили на ділянках р. Стир до водозабору (А) та після (В) водного скиду РАЕС. Відбір проб та вимірювання хімічних показників здійснювався відповідно до стандартних методів (таблиця 2), із застосуванням атестованих вимірювальних методик.

Аналіз хімічних показників проб включав вимірювання концентрацій БСК<sub>5</sub>, ХСК, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, N-NH<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> та РК. Контроль хімічних показників здійснювався сертифікованою лабораторією РАЕС (свідоцтво про визнання вимірювальних можливостей №R-8/11-57-5 від 22.12.17 р.).

Таблиця 2

Характеристика методів вимірювання<sup>1)</sup> показників якості води, що використані у дослідженні

Показник	ДВ	δ, %	Метод	ЗВ
РК, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	1,0 - 14	0,5 - 2,0: ±20 %; понад 2,0: ±10 %	MVV 081/12-0008-01, 2001	Бюретка, ваги лабораторні
БСК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	0,5 - 15	0,5 - 2: δ = ±(90 - 27) %; 2 - 5: δ = ±(27 - 11) %; 5 - 15 %: δ = ±(11 - 5) %	KND 211.1.4.024-95, 1995	
ХСК, мгО/дм <sup>3</sup>	5 - 100	5 - 10: δ = ±(65 - 34) %; 10 - 30: δ = ±(34 - 14) %; 30 - 100: δ = ±(14 - 9) %	KND 211.1.4.021-95, 1995	
N-NH <sub>3</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	0,1 - 50,0	0,1 - 0,5: ±20 %; 0,5 - 50: ±9 %	MVV 081/12-0106-03, 2003	Спектрофотометр ULAB S102 чи UNIKO 1201
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0,05 - 1,0	±50 %	KND 211.1.4.023-95, 1995	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0,5 - 100	±25 %;	MVV 081/12-0651-09, 2009	
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0,05 - 100	0,05 - 0,50: ±15 %; 0,5 - 100: ±10 %	MVV 081/12-0005-01, 2001	

Примітка: <sup>1)</sup> – ДІ – діапазон вимірювання; δ – межі відносної похибки;

ЗВ – засоби вимірювань; концентрація DIN розраховувалась як сума концентрацій NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, N-NH<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> в перерахунок на азот

Статистичний аналіз включав обчислення середніх значень (M), стандартних відхилень (SD), коефіцієнту варіацій (CV) та діапазону (min-max) для кожного з хімічних показників. Програмне забезпечення Minitab software (Version 21.4.1, Minitab, LLC) було застосоване для статистичної обробки даних.

Коефіцієнт кореляції Пірсона (r) використовувався для визначення сили лінійного зв'язку між двома змінними. У діапазоні -0,1 < r < 0,1 зв'язок між змінними відсутній; r у діапазоні від 0,10 до 0,39 або від -0,10 до -0,39 вказує на слабку позитивну або негативну кореляцію відповідно; r у діапазоні від 0,40 до 0,65 або від -0,40 до -0,65 вказує на середню (помірну) позитивну або негативну кореляцію відповідно; r у діапазоні від 0,65 до 0,9 або від -0,65 до -0,9 вказує на сильну позитивну або негативну кореляцію відповідно, r у діапазоні від 0,9 до 1,0 або від -0,9 до -1,0 вказує на дуже сильну позитивну або негативну кореляцію відповідно (Qian et al., 2024).

Для оцінки органічного забруднення води використовувалися чотири методики розрахунку ІОЗ. Методика (Chen et al., 2023) базується на використанні хімічних показників БСК<sub>5</sub>, ХСК, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> та РК та розраховується за формулою (1). Методика (Radhan et al., 2017) передбачає розрахунок ІОЗ із заміною показника NO<sub>3</sub><sup>-</sup> на N-NH<sub>3</sub> та виключенням PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> та розраховується за формулою (2). Методика (Makki et al., 2023) для розрахунку ІОЗ враховує лише БСК<sub>5</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> та розраховується за формулою (3). Методика (Son et al., 2023) для розрахунку ІОЗ включає ХСК, сумарну концентрацію сполук азоту (DIN), PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> та РК, що розраховується за формулою (4).

$$IOZ = \frac{БСК_5^i}{БСК_5^0} + \frac{ХСК^i}{ХСК^0} + \frac{NO_3^i}{NO_3^0} + \frac{PO_4^{3-i}}{PO_4^{3-0}} - \frac{РК^i}{РК^0} \quad (1)$$

$$IOZ = \frac{БСК_5^i}{БСК_5^0} + \frac{ХСК^i}{ХСК^0} + \frac{N-NH_3^i}{N-NH_3^0} - \frac{РК^i}{РК^0} \quad (2)$$

$$IOZ = \frac{\sum_{i=1}^n C_{mi}}{n} \cdot 10 \quad (3)$$

$$IOZ = \frac{ХСК^i}{ХСК^0} + \frac{DIN^i}{DIN^0} + \frac{PO_4^{3-i}}{PO_4^{3-0}} - \frac{РК^i}{РК^0} \quad (4)$$

де  $C_i(i)$  – фактична концентрація певного показника;  $C_{mi}(o)$  – ГДК для відповідного типу водойм;  $n$  – кількість хімічних показників у розрахунку.

Якщо значення ІОЗ  $\geq 2$  розраховані за формулами (1, 2), то це свідчить про те, що природна вода починає забруднюватися органічними речовинами. Для ІОЗ, розрахованого за формулою (3), встановлені такі рівні: відсутнє  $< 10$ ; слабке 10–29; середнє 30–39; слабке 40–49; погіршується 50–59;

погане 60–69. ІОЗ, розрахований за (4), поділяється на чотири категорії: відмінний, при значеннях  $< 0$ ; добрий, при значеннях 0–1; забруднений, при значеннях 1–4; надзвичайно забруднений, при значеннях 4–5.

### Результати дослідження

Зміна концентрацій за контрольованими показниками у воді р. Стир в зоні впливу водних скидів (табл. 3).

Таблиця 3

Зміна концентрацій за контрольованими показниками у воді р. Стир в зоні впливу водних скидів

Показник	Одиниці вимірювання	min–max	M	SD	CV, %
$\text{NO}_3^-$	мг/дм <sup>3</sup>	12,18–20,07	15,81	$\pm 0,49$	52,74
$\text{NO}_2^-$	мг/дм <sup>3</sup>	0,02–0,22	0,09	$\pm 0,06$	45,78
N–NH <sub>3</sub>	мг/дм <sup>3</sup>	0,25–1,93	0,56	$\pm 1,17$	59,17
ХСК	мгО/дм <sup>3</sup>	17,6–83,2	45,7	$\pm 22,5$	46,9
БСК <sub>5</sub>	мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	0,86–3,87	1,32	$\pm 0,17$	23,4
$\text{PO}_4^{3-}$	мг/дм <sup>3</sup>	0,09–0,59	0,295	$\pm 0,13$	35,9
РК	мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	7,56–13,65	10,54	$\pm 2,32$	25,4

Значення І–А–ІОЗ та І–В–ІОЗ (Рис. 1) для місць відбору А (до скиду) та В (після скиду), розраховані за формулою (1) для ГДК F та H характеризувалися як «чисті», за винятком окремих періодів із перевищенням ІОЗ  $> 2$ , що відповідало стану «забруднені». Перевищення І–(А,В)–ІОЗ спостерігалися при зростанні значень ХСК і БСК<sub>5</sub> у теплий період та  $\text{NO}_3^-$  у холодний період року.

Значення ІІ–А–ІОЗ та ІІ–В–ІОЗ (Рис. 2), для місць відбору А (до скиду) та В (після

скиду) розраховані за формулою (2) для ГДК нормативів F та H мали подібну до І–(А,В)–ІОЗ динаміку: загалом показник відповідав «чистим» значенням із незначними періодами «забруднені».

Значення ІІІ–А–ІОЗ та ІІІ–В–ІОЗ (Рис. 3), розраховані за формулою (3) для ГДК нормативів F та H не виявляли органічного забруднення протягом жодного сезону, а рівень забруднення води варіювався між «відсутнім» та «слабким».

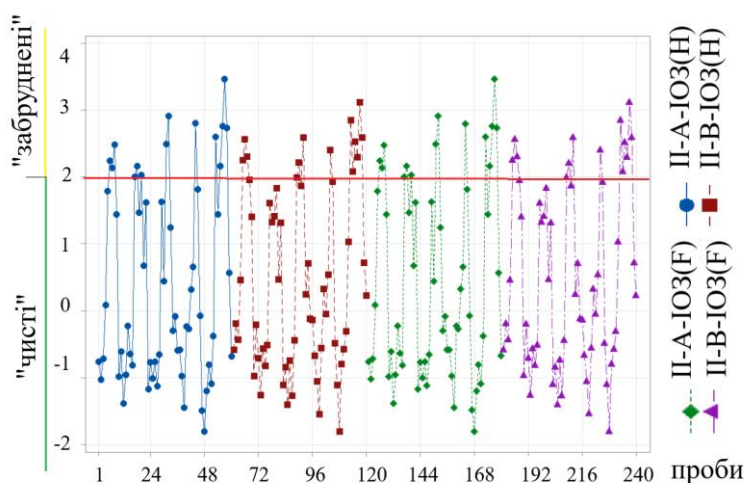


Рис. 1. Значення ІОЗ та характеристика органічного забруднення для води р. Стир розраховані за формулою (1)

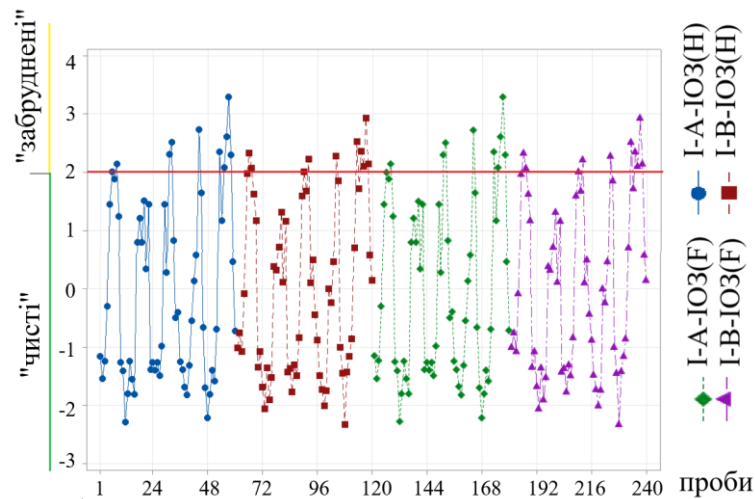


Рис. 2. Значення ІОЗ та характеристика органічного забруднення для води р. Стир розраховані за формулою (2)

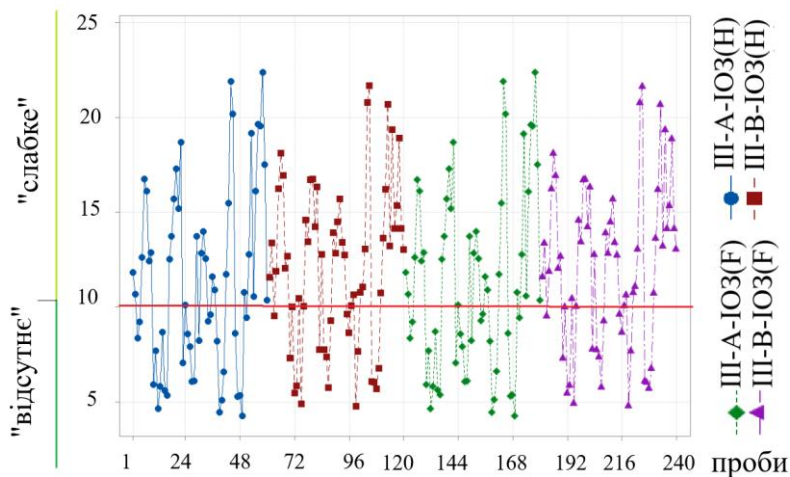


Рис. 3. Значення ІОЗ та характеристика органічного забруднення для води р. Стир розраховані за формулою (3)

Значення IV-A-IO3 та IV-B-IO3 (Рис. 4), для місць відбору А (до скиду) та В (після скиду), що розраховані за формулою (4) для ГДК нормативів F та H демонстрували стан

від «хорошого» у весняний та осінній періоди до «легко забрудненого» і «помірно забрудненого» у зимово-осінній сезон.

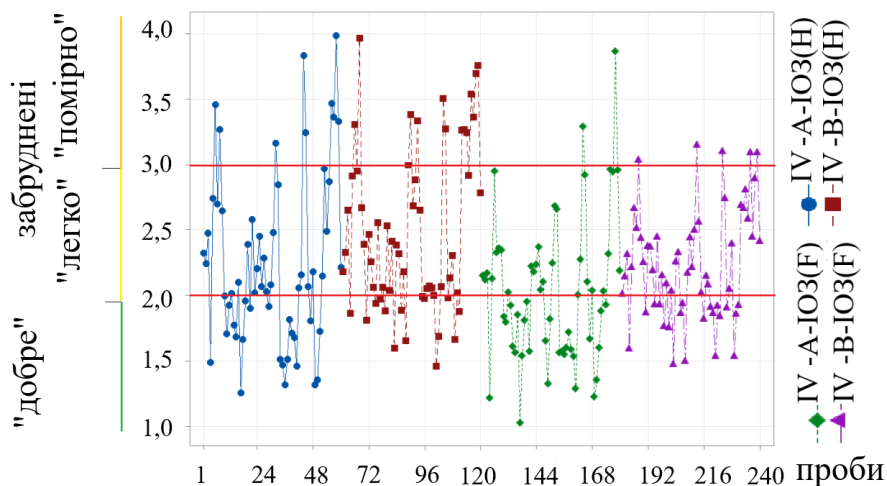


Рис. 4. Значення ІОЗ та характеристика органічного забруднення для води р. Стир розраховані за формулою (4)



ІОЗ води р. Стир, що розраховані за ГДК для нормативів F та H суттєво не відрізняються (Рис. 1–4), оскільки значення ГДК однакові для БСК<sub>5</sub>, РК, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> та незначно відрізняються для NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, ХСК (табл. 1).

Кореляція значень ІОЗ, що розрахована за різними методиками (I-IV), місцями відбору (А, В), та нормативами ГДК (Н, F) вказана на рис. 5. Значення кореляції  $r \geq 0,7$  свідчать про сильний лінійний зв'язок між більшістю ІОЗ. Це вказує на те, що індекси можуть бути взаємопов'язані через спільні

фактори, які впливають на рівень органічного забруднення. Значення  $r$  між I-B-ІОЗ(Н) та I-A-ІОЗ(F) становить 0,95, що означає, що будь-яке збільшення одного індексу, супроводжуватиметься аналогічним збільшенням іншого. Для пари III-B-ІОЗ(Н) і IV-A-ІОЗ(F), значення  $r$  становить 0,62, що вказує на середній, але не ідеальний зв'язок. Це може свідчити про те, що ці індекси частково залежать від однакових умов, але можуть включати різні специфічні фактори та хімічні показники.

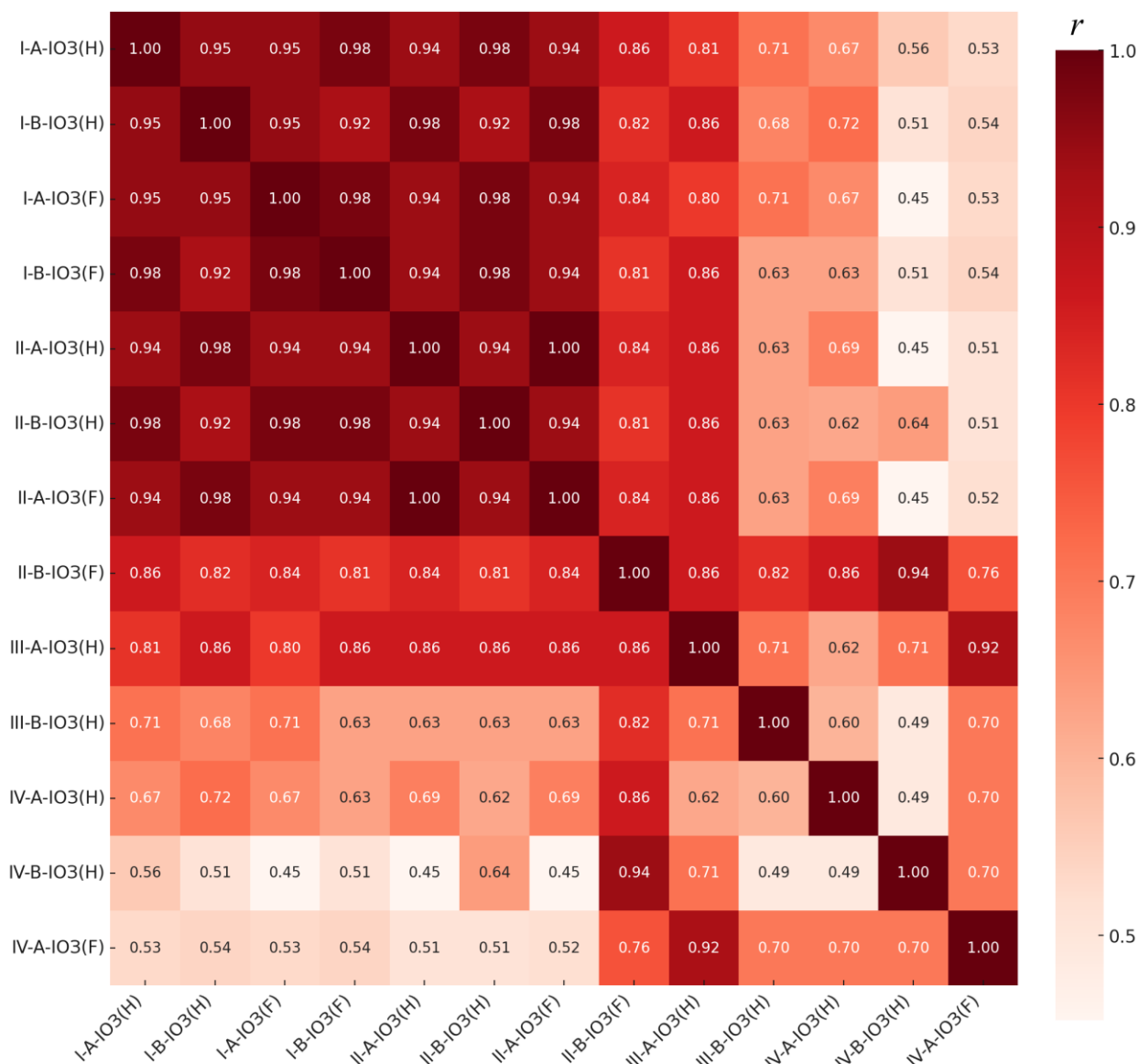


Рис. 5. Кореляційна матриця коефіцієнтів Пірсона ( $r$ ) для значень ІОЗ води р. Стир

### Обговорення отриманих результатів

Дослідження якості води р. Стир у зоні впливу водних скидів РАЕС демонструє значну варіативність гідрохімічних показників. Проаналізовані дані вказують на періодичні перевищення концентрації

показників значень ГДК, що підтверджує необхідність систематичного моніторингу. Перевищення ГДК фіксуються на ділянці р. Стир до водозабору та після водного скиду РАЕС. Показники концентрації азотних сполук, зокрема NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, показали високий



рівень коливань 12,18–20,07 мг/дм<sup>3</sup>. Хоча значення не перевищували нормативу (ГДК F – 40 мг/дм<sup>3</sup>, Н – 45 мг/дм<sup>3</sup>), максимальні концентрації фіксувалися у холодний період року. Це може бути наслідком зменшення швидкості денітрифікації та збільшення стоку добрив у зимово-весняний період (Biedunkova and Kuznietsov, 2023). Значення концентрації показнику N–NH<sub>3</sub> варіювали у межах 0,25–1,93 мг/дм<sup>3</sup>, із середнім значенням 0,56 мг/дм<sup>3</sup>, що часто перевищує ГДК F (0,5 мг/дм<sup>3</sup>), але відповідає нормативам Н (2 мг/дм<sup>3</sup>). Перевищення концентрації N–NH<sub>3</sub> сигналізує про можливе надходження органічних забруднень із побутових або промислових джерел (Biedunkova et al., 2024). Концентрація БСК<sub>5</sub> (0,86–3,87 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>) загалом знаходиться в межах допустимих ГДК для обох типів водойм (ГДК F і Н – 3 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>), що свідчить про помірну інтенсивність біохімічних процесів розкладу органіки. Однак, значення концентрації ХСК демонстрували значну варіативність (17,6–83,2 мгО/дм<sup>3</sup>, M=45,7 мгО/дм<sup>3</sup>), де максимальні значення перевищували ГДК для Н (30 мгО/дм<sup>3</sup>), що вказує на надходження хімічних забруднень. Розраховані значення ІОЗ за формулами (1) та (2) показали, що вода р. Стир здебільшого відповідає характеристиці «чисті», хоча періодичні перевищення (ІОЗ > 2) фіксувалися в теплі місяці через підвищення концентрацій ХСК і БСК<sub>5</sub>, а також у зимовий період через зростання концентрації NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Це узгоджується з відомими гідробіологічними закономірностями, коли в теплий період зростає активність мікроорганізмів, а у холодний – інтенсивність вимивання азотних сполук через розклад органічних сполук (Kuznietsov et al., 2024). Розрахунки ІОЗ за формулою (3) показали відсутність значного органічного забруднення протягом року, зі станом «відсутнє» або «слабке». ІОЗ за формулою (4) у весняно-літній період переважно характеризувався як «хороший», тоді як у зимово-осінній сезон вода переходила до стану «легко забруднена» або «помірно забруднена».

Результати підтверджують переважно задовільну якість води р. Стир, хоча сезонні перевищення ГДК для деяких показників підкреслюють необхідність:

- посилення контролю за скидами стічних вод;
- адаптації нормативів до локальних умов;

– проведення регулярного моніторингу для виявлення джерел забруднення. Високі значення  $\gamma$  між методиками свідчать про їхню узгодженість, навіть попри використання різних хімічних показників. Це підтверджує надійність та універсальність підходів до оцінки органічного забруднення за ІОЗ. Отже, сильний зв'язок між І–А–ІОЗ(Н) і І–В–ІОЗ(Н) може вказувати на стабільність гідрохімічних умов у зоні впливу скидів РАЕС і свідчить про те, що вибір нормативів (F або Н) мінімально впливає на результат оцінки, оскільки для ІОЗ за розрахунками ГДК для Н та F призначення демонструє високі значення  $\gamma$ . Водночас для показників, де рівні ГДК суттєво різняться (наприклад, для ХСК та N–NH<sub>3</sub>), результати розрахунків ІОЗ можуть бути більш варіативними. Сезонні коливання значень ІОЗ, особливо у теплий період через підвищення ХСК і БСК<sub>5</sub>, а також у зимовий період через накопичення NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, також впливають на кореляційні зв'язки. Наприклад, у зимовий період менш тісний зв'язок між ІОЗ (рис. 1–4), розрахованими для різних ділянок, може свідчити про вплив специфічних сезонних процесів, таких як зменшення швидкості денітрифікації або підвищення вимивання азотних сполук. Відносно нижча кореляція між методиками III та IV ( $r = 0,62–0,67$ ) пояснюється різницею у вагомості показників, що використовуються для розрахунку (рис. 3). Наприклад, формула IV враховує сумарну концентрацію азотних сполук (DIN), яка менше відображає поточні біохімічні процеси порівняно з БСК<sub>5</sub>, що використовується у формулі I. Це свідчить про необхідність більш детального врахування екосистемних факторів, таких як інтенсивність біологічного розкладу органіки. Висока кореляція між значеннями ІОЗ, розрахованими для ділянок А (до скиду) та В (після скиду), обумовлена географічною близькістю місць відбору проб та відсутністю значного внеску органічного забруднення зі скидними водами РАЕС.

### Висновки

Якість води р. Стир у зоні впливу водних скидів РАЕС, за показниками органічного забруднення, загалом є задовільною, проте результати дослідження свідчать про сезонні коливання гідрохімічних показників, що можуть перевищувати встановлені ГДК. Це підкреслює значення антропогенного впливу, зокрема скидів РАЕС, як чинника, що впливає на екологічний стан

водойми. Аналіз ІОЗ за різними методиками дозволив виявити суттєві сезонні відмінності. Значення ІОЗ, розраховані за формулами (1) та (2), свідчать, що вода річки Стир загалом класифікується як «чиста», хоча у теплий період фіксувалися перевищення порогу  $ІОЗ > 2$ , що відповідає категорії «забруднена». Розрахунки ІОЗ за формулами

(3) і (4) здебільшого підтверджували добрий стан води, але у зимово-осінній період спостерігалися ознаки легкого та помірного забруднення. Результати підкреслюють узгодженість значень ІОЗ та їхню придатність для оцінки екологічного стану водних об'єктів.

#### **Фінансування / Funding**

Відсутність фінансування / No external funding.

#### **Етичне схвалення / Ethical approval**

Не застосовується / Not applicable.

#### **Інформована згода / Informed consent**

Не застосовується / Not applicable.

#### **Доступ до даних / Availability of data**

Дані у складі публікації / Data in the publication.

#### **Конфлікт інтересів / Conflict of interest**

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

### **References**

Biedunkova, O. O., & Kuznietsov, P. M. (2023). Factor analysis of the dynamics of nitrogenous substances in the water of the Styr River in the zone of influence of the Rivne NPP. *Bulletin National University of Water and Environmental Engineering. Series Agricultural Sciences*, 1(101), 3–17. <https://doi.org/10.31713/vs120231> (in Ukrainian).

Бедункова О. О., Кузнецов П. М. Факторний аналіз динаміки азотних речовин води річки Стир у зоні впливу Рівненської АЕС. *Вісник Національного університету водного господарства та природо-користування. Серія Сільськогосподарські науки*. 2023. Вип. 1, № 101. С. 3–17. <https://doi.org/10.31713/vs120231>

Biedunkova, O., Kuznietsov, P., & Gandziura, V. (2024). Behaviour of dissolved inorganic salts in the cooling water of a nuclear power plant open recirculation system and formation of water discharge. *Royal Society Open Science*, 11(8), 240492. <https://doi.org/10.1098/rsos.240492>

Chen, X., Wang, Y., Jiang, L., Huang, X., Huang, D., Dai, W., & Wang, D. (2023). Water quality status response to multiple anthropogenic activities in urban river. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(2), 3440–3452. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22378-1>

Directive 2000/60/EC (2000). Directive of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32000L0060>

Environmental safety standards for water bodies used for fisheries: Order of the Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine of 30.07.2012 No. 471. (2012). (in Ukrainian)

Нормативи екологічної безпеки водних об'єктів, що використовуються для потреб рибного господарства: Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України від 30.07.2012 № 471.

Guidelines for the development of standards for maximum permissible discharge of pollutants into water bodies: Order of the Ministry of Environmental Protection of Ukraine dated 05.03.2021 No. 173. (2021). (in Ukrainian)

Методичні рекомендації з розроблення нормативів гранично допустимого скидання забруднюючих речовин у водні об'єкти: Наказ Міністерства захисту довкілля України від 05.03.2021 № 173.

Hygienic requirements for water of water bodies to meet the needs of the population: Order of the Ministry of Health of Ukraine of May 2, 2022, No. 721. (2022). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text> (in Ukrainian)

Гігієнічні вимоги до води водних об'єктів для забезпечення потреб населення: Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 2 травня 2022 р. № 721.

KND 211.1.4.021-95 (1995). Method for determining chemical oxygen demand (COD) in surface and waste water. Order of the Ministry of Environmental Protection and Nuclear Safety of Ukraine of 25.04.95, No. 21. (in Ukrainian)

КНД 211.1.4.021-95. Метод визначення хімічного споживання кисню (ХСК) у поверхневих та стічних водах. Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища та ядерної безпеки України від 25.04.95 р. № 21.

KND 211.1.4.023-95 (1995). Methodology for photometric determination of nitrite ions with Gries reagent in surface and treated wastewater. Order of the Ministry of Environmental Protection and Nuclear Safety of Ukraine of 25.04.95, No. 21. (in Ukrainian).

КНД 211.1.4.023-95. Методика фотометричного визначення нітрит-іонів з реактивом Гріса в поверхневих та очищених стічних водах. Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища та ядерної безпеки України від 25.04.95 р. № 21.

KND 211.1.4.024-95 (1995). Method for determination of biochemical oxygen consumption in n days (BOD) in natural and waste water. Order of the Ministry of Environmental Protection and Nuclear Safety of Ukraine of 25.04.95, No. 21. (in Ukrainian).

КНД 211.1.4.024-95. Метод визначення біохімічного споживання кисню через n діб (БСК) у природних та стічних водах. Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища та ядерної безпеки України від 25.04.95 р. № 21.

Kuznietsov, P. (2024). Evaluation of the scaling and corrosive potential of the cooling water supply system of a nuclear power plant based on the physicochemical control dataset. *Data in Brief*, 54, 110347. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110347>

Kuznietsov, P. M., & Biedunkova, O. O. (2023). Study of temperature impact of discharges and balance of biogenic elements in the water of the Styr river in the impact zone of the Rivne NPP. *Nuclear Power and the Environment*, 3(28), 49–58. <https://doi.org/10.31717/2311-8253.23.3.6>

Kuznietsov, P., & Biedunkova, O. (2024). Assessment of the Impact of Organic Matter Discharge from a Nuclear Power Plant with a Recirculating Cooling Water System. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(4), 221. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07025-4>

Kuznietsov, P. M., Biedunkova, O. O., Yaroshchuk, O. V., & Pryshchepa, A. M. (2024). Optimization of the anti-scale corrective treatment of water by organic phosphonate. *Science and Innovation*, 20(2), 79–90. <https://doi.org/10.15407/scine20.02.079>

List of maximum permissible concentrations of harmful substances for waters of fishery reservoirs. Approved by Golovrybvod 09.08.1990 № 12-04-11. (1990). 46 p. Order of 31.08.2017 No. 473 On Approval of the List of Industry Standards and Other Regulatory Documents of the Former USSR Equivalent to Them to Be Used in Hydrometeorological Activities until 01.01.2025 (in Ukrainian)

Наказ від 31.08.2017 № 473 Про затвердження Переліку галузевих стандартів і прирівняних до них інших нормативних документів колишнього СРСР, які будуть використовуватися у гідрометеорологічній діяльності до 01.01.2025. Перелік гранично допустимих концентрацій шкідливих речовин для вод рибогосподарських водойм. Затв. Головрибводом 09.08.1990 № 12-04-11. – 1990. – 46 с.

Makki, A. N., Al-Abbawy, D. A., & Hammadi, N. S. (2023). Assessment of Water Quality Using Organic Pollution Index in Some Marshes North of Basra Province. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1158(3), 032005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1158/3/032005>

MVV 081/12-0005-01 (2001). Methodology for measuring the mass concentration of dissolved orthophosphates by photometric method. Order of the Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine of 03.09.02 No. 336. (in Ukrainian).

МВВ 081/12-0005-01. Методика виконання вимірювань масової концентрації розчинених ортофосфатів фотометричним методом. Наказ Міністерства екології та природних ресурсів України від 03.09.02 № 336.

MVV 081/12-0008-01 (2001). Surface and treated wastewater. Procedure for measuring the mass concentration of dissolved oxygen by the Winkler iodometric titration method. Order of the Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine of 03.09.02 No. 336. (in Ukrainian)

МВВ 081/12-0008-01. Поверхневі та очищені стічні води. Методика виконання вимірювань масової концентрації розчиненого кисню методом йодометричного титрування за Вінклером. Наказ Міністерства екології та природних ресурсів України від 03.09.02 № 336.

MVV 081/12-0106-03 (2003). Method for measuring the mass concentration of ammonium ions by the photocolometric method with Nessler's reagent. Order of the Minister of Environmental Protection of Ukraine dated 30.06.04 No. 257. (in Ukrainian)

МВВ 081/12-0106-03. Методика виконання вимірювань масової концентрації амоній-іонів фотоколориметричним методом з реактивом Неслера. Наказ Міністра охорони навколишнього природного середовища України від 30.06.04 № 257.

MVV 081/12-0651-09 (2009). Methodology for measuring the mass concentration of nitrate ions by the photocolometric method. Order of the Minister of Environmental Protection of Ukraine No. 54 of February 3, 2010. (in Ukrainian)

МВВ 081/12-0651-09. Методика виконання вимірювань масової концентрації нітрат-іонів фотоколориметричним методом. Наказ Міністра охорони навколишнього природного середовища України № 54 від 3 лютого 2010 р.

Radhan, R. V.; Zainudin, Z. & Sreekanth, G. B. (2017). Temporal water quality response in an urban river; a case study in peninsular Malaysia. *Appl. Water Sci.* 7, 923–933. <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0303-1>

Son, C. T., Giang, N. T. H., Thao, T. P., Nui, N. H., Lam, N. T., & Cong, V. H. (2020). Assessment of Cau River water quality using a combination of water quality and pollution indices. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 69(2), 160-172. <https://doi.org/10.2166/aqua.2020.122>

VishnuRadhan, R., Zainudin, Z., Sreekanth, G. B., Dhiman, R., Salleh, M. N., & Vethamony, P. (2017). Temporal water quality response in an urban river: a case study in peninsular Malaysia. *Applied Water Science*, 7, 923-933. <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0303-1>

Qian, Q., He, M., Sun, F., & Liu, X. (2024). Monitoring and evaluation of the water quality of the Lower Neches River, Texas, USA. *Water Science and Engineering*, 17(1), 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.10.002>

Water Code of Ukraine (1995). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text> (in Ukrainian)

Водний Кодекс України, 1995. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text>

Received: 26.01.2025. Accepted: 17.02.2025. Published: 03.04.2025.

**Ви можете цитувати цю статтю так:**

Бедункова О., Кузнецов П. Дослідження органічного забруднення поверхневих вод річки у зоні антропогенного впливу водного скиду. *Biota. Human. Technology*. 2025. №1. С. 126-136.

**Cite this article in APA style as:**

Biedunkova, O., & Kuznietsov, P. (2025). Study of organic pollution of surface waters of the river in the zone of anthropogenic impact of water discharge. *Biota. Human. Technology*, 1, P. 126-136. (in Ukrainian)

**Information about the authors:**

**Biedunkova O.** [*in Ukrainian: Бедункова О.*] <sup>1</sup>, Dr. of Biol. Sc., Professor, email: o.o.biedunkova@nuwm.edu.ua  
ORCID: 0000-0003-4356-4124 Scopus-Author ID: 57193439260 ResearcherID: H-9464-2018  
Department of ecology, environmental protection technology and forestry, National University of Water and Environmental Engineering  
11 Soborna Street, Rivne, 33028, Ukraine

**Kuznietsov P.** [*in Ukrainian: Кузнецов П.*] <sup>2</sup>, Post-graduate Student, email: p.m.kuznietsov@nuwm.edu.ua  
ORCID: 0000-0002-8263-0000 Scopus-Author ID: 58164425200 ResearcherID: HJP-5120-2023  
Department of ecology, environmental protection technology and forestry, National University of Water and Environmental Engineering  
11 Soborna Street, Rivne, 33028, Ukraine

---

<sup>1</sup> Study design, manuscript preparation.

<sup>2</sup> Study design, data collection, statistical analysis.





**FOOD TECHNOLOGIES**

**ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ**





Copyright (c) 2025 Nadiia Lapytska, Olena Rybalochko, Diana Kavurko

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/).

Надія Лапицька, Олена Рибалочко, Діана Кавурко

**КВАЛІМЕТРИЧНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ЗАМОРОЖЕНИХ ДЕСЕРТІВ МОТІ,  
ВИГОТОВЛЕНИХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПОБІЧНИХ ПРОДУКТІВ  
СОКОВОГО ВИРОБНИЦТВА**

Nadiia Lapytska, Olena Rybalochko, Diana Kavurko

**QUALIMETRIC EVALUATION OF THE MOCHI FROZEN DESSERTS MADE USING  
BY-PRODUCTS OF JUICE PRODUCTION****АНОТАЦІЯ**

Роботу присвячено кваліметричній оцінці якості заморожених десертів Моті із використанням побічних продуктів сокового виробництва як плодової складової начинки.

Побічними продуктами сокового виробництва, які запропоновано використовувати у представлених дослідженнях, є вичавки яблук і чорниці. Вони значною мірою накопичуються на консервних заводах і у закладах ресторанного господарства. В переважній більшості вичавки утилізуються завдаючи при цьому економічних збитків підприємствам та негативно впливають на навколишнє середовище забруднюючи його. Лише 8 % таких побічних продуктів переробляється в подальшому на комбікормових заводах та для виробництва пектину. Проте вичавки мають значний потенціал як збагачувальна сировина для виробництва продуктів оздоровчого призначення адже мають багатий на харчові волокна, вітаміни і мінеральні речовини хімічний склад. Використання вичавок при виробництві заморожених десертів Моті дозволить отримати функціональні продукти з доданою вартістю завдяки комплексній переробці сировини. Введення нетрадиційної збагачувальної сировини може суттєво відобразитися не лише на харчовій цінності десертів, а й на їх якості. Тому для комплексної оцінки якості заморожених десертів розроблено «дерево властивостей», що включає органолептичні, фізико-хімічні та структурно-механічні показники якості, а також харчову і енергетичну цінність. Визначено коефіцієнти вагомості одиничних і групових властивостей. Згідно до розробленого «дерева властивостей» здійснено кваліметричну оцінку якості заморожених десертів Моті.

**Мета статті** – комплексне оцінювання якості заморожених десертів Моті, виготовлених із використанням побічних продуктів сокового виробництва, як компонента начинки, та камеді гуару, як стабілізатора рисового тіста, застосуванням принципів кваліметрії.

**Методологія.** Під час проведення роботи використовували фізико-хімічні, органолептичні методи досліджень, принципи кваліметрії що враховують одиничні і групові якості розробленої продукції. Опрацювання результатів здійснювали за допомогою баз даних MS Excel.

**Наукова новизна** полягає у тому, що застосуванням принципів кваліметрії встановлено ефективність внесення 10 % камеді гуару від маси рисового борошна для запобігання втрати структурно-механічних властивостей тіста десертів Моті під час заморожування і відтавання. Також встановлена доцільність використання яблучних і чорничних вичавок для збагачення заморожених десертів Моті та надання їм доданої вартості за рахунок комплексної переробки сировини.

**Висновки:** розроблено «дерево властивостей» заморожених десертів Моті. На основі складеного «дерева властивостей» здійснено комплексну оцінку якості розроблених виробів за використання яблучних або чорничних вичавок як плодової компоненти начинки та камеді гуару як стабілізатора структури рисового тіста. На основі проведеної кваліметричної оцінки якості до впровадження у виробництво рекомендовано заморожені десерти Моті, тісто яких буде містити 10 % камеді гуару від маси рисового борошна. При цьому для начинки рекомендовано використовувати як яблучні, так і чорничні вичавки у якості плодового компоненту. Крім того, розроблене «дерево властивостей» може в подальшому використовуватися для комплексної оцінки якості заморожених десертів на основі молочно-плодової сировини за використання різних збагачувальних добавок.

**Ключові слова:** кваліметрія, комплексний показник якості, заморожені десерти Моті, вичавки яблук, вичавки чорниці, камедь гуару, рисове тісто

## ABSTRACT

The work is devoted to the qualimetric evaluation of the quality of Mochi frozen desserts using by-products of juice production as a fruit filling.

The by-products of juice production, which are proposed to be used in the presented studies, are apple and blueberry extracts. They accumulate to a large extent in canneries and restaurants. In the vast majority of squeezes, they are disposed of, causing economic losses to enterprises and negatively affecting the environment by polluting it. Only 8 % of such by-products are further processed in compound feed plants and for the production of pectin. However, pomace has significant potential as an enriching raw material for the production of health products, as they have a chemical composition rich in dietary fibers, vitamins and minerals. The use of pomace in the production of Mochi frozen desserts will allow to obtain functional products with added value thanks to the complex processing of raw materials. The introduction of non-traditional fortifying raw materials can significantly affect not only the nutritional value of desserts, but also their quality. Therefore, for a comprehensive assessment of the quality of frozen desserts, a "property tree" has been developed, which includes organoleptic, physico-chemical and structural-mechanical quality indicators, as well as nutritional and energy value. The weighting coefficients of individual and group properties are determined. According to the developed "property tree", a qualitative assessment of the quality of Mochi frozen desserts was carried out.

**The purpose of the article** – comprehensive evaluation of the quality of Mochi frozen desserts made using the by-products of juice production as a filling component and guar gum as a rice dough stabilizer, using the principles of qualimetry.

**Methodology.** During the work, we used physico-chemical, organoleptic research methods, principles of qualimetry that take into account individual and group qualities of the developed products. Results were processed using MC Excel databases.

**The scientific novelty** is that the application of the principles of qualimetry established the effectiveness of adding 10 % of guar gum to the weight of rice flour to prevent the loss of structural and mechanical properties of Mochi dessert dough during freezing and thawing. The expediency of using apple and blueberry juice for enriching Mochi frozen desserts and providing them with added value due to complex processing of raw materials has also been established.

**Conclusions:** a "property tree" of Mochi frozen desserts was developed. On the basis of the compiled "property tree", a comprehensive assessment of the quality of the developed products was carried out using apple or blueberry pomace as a fruit component of the filling and guar gum as a rice dough structure stabilizer. Based on the conducted qualitative assessment of quality, Mochi frozen desserts are recommended for production, the dough of which will contain 10 % of guar gum by mass of rice flour. At the same time, it is recommended to use both apple and blueberry pomace as a fruit component for the filling. In addition, the developed "property tree" can be used in the future for a comprehensive assessment of the quality of frozen desserts based on dairy and fruit raw materials with the use of various enrichment additives.

**Key words:** qualimetry, comprehensive quality indicator, Mochi frozen desserts, apple by-products of juice, blueberry by-products of juice, guar gum, rice dough

### Постановка проблеми

*Актуальність роботи.* Сьогодні одним із напрямків розвитку харчової промисловості є розроблення харчових продуктів, які б задовольняли потреби споживачів, що мають харчові розлади. Впровадження нових технологій продуктів харчування та використання нетрадиційної сировини для їх виробництва потребує наукового обґрунтування. Розроблена продукція повинна відповідати стандартам якості, мати високу харчову цінність, бути доступною для споживання людьми із харчовими розладами. Такою продукцією можуть бути заморожені десерти Моті. Тісто для Моті традиційно виготовляють із безглютеного рисового борошна, а начинка таких виробів може бути авторською і розроблена таким чином, щоб не містила глютену. У такому разі десерти Моті будуть доступними для людей, які мають непереносимість глютену, алергію на пшеницю та хворих на целиакію.

Враховуючи важливість комплексної переробки сировини для зменшення кількості відходів і побічних продуктів, що значною мірою накопичуються на підприємствах харчової промисловості та ресторанного господарства (Kowalski & Gumul, 2024; Kandemir et al., 2022), доцільним є дослідження щодо використання вичавок із яблук і чорниці, як компоненту начинки для десертів Моті. Включення побічних продуктів сокового виробництва до рецептури заморожених десертів Моті сприятиме покращанню харчової цінності нових продуктів завдяки хімічному складу вичавок, багатих на харчові волокна, вітаміни та мінеральні речовини, але може суттєво вплинути на формування органолептичних показників виробів, їх сенсорне сприйняття споживачем.

Для забезпечення критеріїв якості, безпечності та поживності виробів, що розробляються, важливо приділяти увагу управлінню якістю продукцією. Застосу-

вання комплексної оцінки якості виробів дозволить встановити оптимальне співвідношення інгредієнтів для створення оздоровчого продукту з високими показниками якості, який матиме найкраще сприйняття серед споживачів.

*Аналіз останніх досліджень та публікацій.*

Харчовою промисловістю випускаються такі заморожені десерти як фруктовий лід (сорбет, щербети, граніте), парфе, морозиво, торти-морозиво, заморожені суфле. Найбільш розповсюдженим серед зазначених заморожених десертів є морозиво. В роботі (Kolesnikova et al., 2023) відмічається, що сучасним трендом виробництва морозива є створення нетрадиційних смаків: на основі гідробіонтів, спецій та прянощів. У цій роботі також обґрунтовано доцільність використання у виробництві заморожених десертів сумішей вершків тваринного походження з м'якими сирами «Фета» та «Рікота», стабілізованих за допомогою молекулярної технології *rasotizing*. Це стало підґрунтям для вибору сирно-вершкової начинки як складової десертів Моті.

Під час розробки нових продуктів або при пошуку шляхів збагачення вже існуючих, значна увага приділяється дослідженню показників якості виробів. Це дозволяє визначити оптимальний склад продукту та кількість нетрадиційної сировини, яку можна використати у його рецептурі для збагачення. Так, наприклад, в роботі (Antoniuk, 2018) встановлений позитивний вплив бурої водорості цистозіри, пюре гарбуза та лляного борошна на органолептичні властивості замороженого мусу і суфле. Відмічено покращання харчової та біологічної цінності розроблених десертів. Проте, у зазначеній роботі відсутні чіткі рекомендації щодо співвідношення компонентів для промислового виробництва десертів. Крім того, у перелічених роботах (Kolesnikova et al., 2023; Antoniuk, 2018) не вирішується питання комплексної переробки сировини. Проблема накопичення побічних продуктів на підприємствах харчової промисловості загострюється щороку. У роботі (Kowalski & Gumul, 2024) зазначається, що кількість відходів при переробці фруктів та овочів становить 22%. Це, по-перше, завдає значних екологічних збитків підприємствам консервної промисловості. По-друге – негативно впливає на екологічність виробництва. Найбільша кількість вичавок накопичується на консервних

заводах за використання плодів та ягід із високим вмістом пектинових речовин та із міцною цитоплазматичною мембраною (Lapytska, 2021), що ускладнює соковіддачу. У цьому зв'язку проводяться дослідження, направлені на збільшення виходу соку. Так, наприклад, в роботі (Lapytska et al., 2023) запропоновано обробляти сливові вичавки шротами зародків пшениці та плодів шипшини. Це, за твердженням авторів, збільшує вихід желюючого соку підвищеної харчової та біологічної цінності. Однак навіть удосконалення процесу пресування не забезпечує безвідходності виробництва. Враховуючи багатий хімічний склад вичавок, який залежить від виду сировини, що переробляється (Kandemir et al., 2022) доцільним є пошук шляхів переробки вичавок та розробки функціональних продуктів за їх використання. У цьому зв'язку вважали за доцільне розглянути можливість використання вичавок із яблук і чорниці для розробки начинки для нових виробів – десертів Моті.

Для надання дослідницьким даним практичного значення в промисловості доцільно застосовувати принципи кваліметрії. Кваліметрія характеризує якість як сукупність великої кількості властивостей продукту, що розглядається. Останнім часом, кваліметрична оцінка якості харчової продукції використовується все частіше (Shydakova-Kamenuka et al., 2015).

У представлений роботі пропонується здійснити комплексну оцінку якості розроблених заморожених десертів Моті.

*Мета роботи:* комплексне оцінювання якості заморожених десертів Моті, виготовлених із використанням побічних продуктів сокового виробництва, як компонента начинки, та камеді гуару, як стабілізатора рисового тіста, застосуванням принципів кваліметрії.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні задачі:

– оцінити органолептичні та фізико-хімічні показники якості розроблених десертів Моті та визначити їх харчову цінність;

– здійснити комплексну оцінку якості розроблених десертів Моті.

*Методологія.* У дослідженнях використовували отримані в лабораторних умовах десерти Моті плодовою компонентою сирно-вершкового крему яких були вичавки або яблук, або чорниці. Плодова складова начинки складала 50 % від її маси. Для

забезпечення збереження еластичності рисового тіста під час багаторазового заморожування і розморожування десерту, на етапі замішування тіста використовували камедь гуару в кількості 10 % або 20 % від маси рисового борошна. Вплив камеді гуару на комплексну оцінку якості десертів Моті здійснювали на прикладі виробів, до складу начинки яких входили яблучні вичавки.

Таким чином, досліджували 4 зразки заморожених десертів Моті: зразок 1 – Моті, до складу начинки яких входять вичавки яблук, тісто виготовлене із 100 % рисового борошна; зразок 2 – Моті, до складу начинки яких входять вичавки чорниці, тісто виготовлене із 100 % рисового борошна; зразок 3 – Моті, до складу начинки яких входять вичавки яблук, тісто виготовлене із 90 % рисового борошна і 10 % камеді гуару; зразок 4 – Моті, до складу начинки яких входять вичавки яблук, тісто виготовлене із 80 % рисового борошна і 20 % камеді гуару.

Порівняння показників якості нових виробів здійснювали із аналогічними десертами іноземних виробників, що присутні на українському ринку, а саме: ТМ «Motiko», Молдова.

Комплексна оцінка якості розроблених виробів здійснювалася із використанням принципів кваліметрії за допомогою узагальненого показника, що враховує одиничні і групові показники якості (Stepankova et al., 2019).

Визначення комплексного показника якості розроблених десертів Моті здійснювали шляхом вирішення наступних питань: побудова «дерева властивостей»; отримання абсолютних значень показників і переведення їх у безрозмірні величини за використання функції бажаності Харрінгтона; визначення коефіцієнтів вагомості кожного показника; визначення групових показників якості; розрахунок комплексного показника якості.

Наукова новизна полягає у тому, що застосуванням принципів кваліметрії встановлено ефективність внесення 10 % камеді гуару від маси рисового борошна для запобігання втрати структурно-механічних властивостей тіста десертів Моті під час заморожування і відтавання. Також встановлена доцільність використання яблучних і чорничних вичавок для збагачення заморожених десертів Моті та надання їм доданої вартості за рахунок комплексної переробки сировини.

## Результати дослідження

Важливе значення при розробці нових видів продукції мають органолептичні показники. Саме за цією групою показників значною мірою буде формуватися конкурентоспроможність розроблених десертів. Проте важливим є й врахування фізико-хімічних та структурно-механічних властивостей розроблених десертів. При виробництві оздоровчих продуктів суттєве значення має й харчова та біологічна цінність нових виробів. Тому доцільною є комплексна оцінка якості десертів Моті, плодним компонентом начинки яких є і яблучні, і чорничні вичавки.

З метою проведення кваліметричної оцінки якості було побудовано ієрархічну структуру показників якості заморожених десертів Моті – «дерево властивостей». Мета побудови його – більш повне розкриття властивостей продукції. Зрозумілим є те, що не всі властивості, включені до дерева, є рівноцінними за значимістю. Саме тому важливим було визначити коефіцієнти вагомості всіх показників якості. Розроблене «дерево властивостей» із зазначенням коефіцієнтів вагомості наведено на рис. 1.

На нульовому рівні «дерева властивостей» розміщується комплексний показник якості замороженого десерту Моті ( $P_0$ ). Він включає в себе значення всіх показників і тому більш повно характеризує якість продукції.

На першому рівні дерева розміщені властивості продукту, що, в свою чергу, поділяються на групи і характеризують цю властивість: органолептичні властивості (РА); фізико-хімічні та структурно-механічні властивості (РВ); показники енергетичної і біологічної цінності (РС).

Першим етапом характеристики комплексного показника якості заморожених десертів Моті є дослідження і характеристика групових показників першого рівня. Органолептичні показники (РА) оцінювала експертна група шляхом проведення дегустації. Слід зазначити, що дегустаційну оцінку розроблених виробів здійснювали після п'ятикратного заморожування і розморожування. Таке рішення було прийнято з метою отримання більш достовірних даних щодо впливу камеді гуару на структуру тіста після багатократного заморожування.



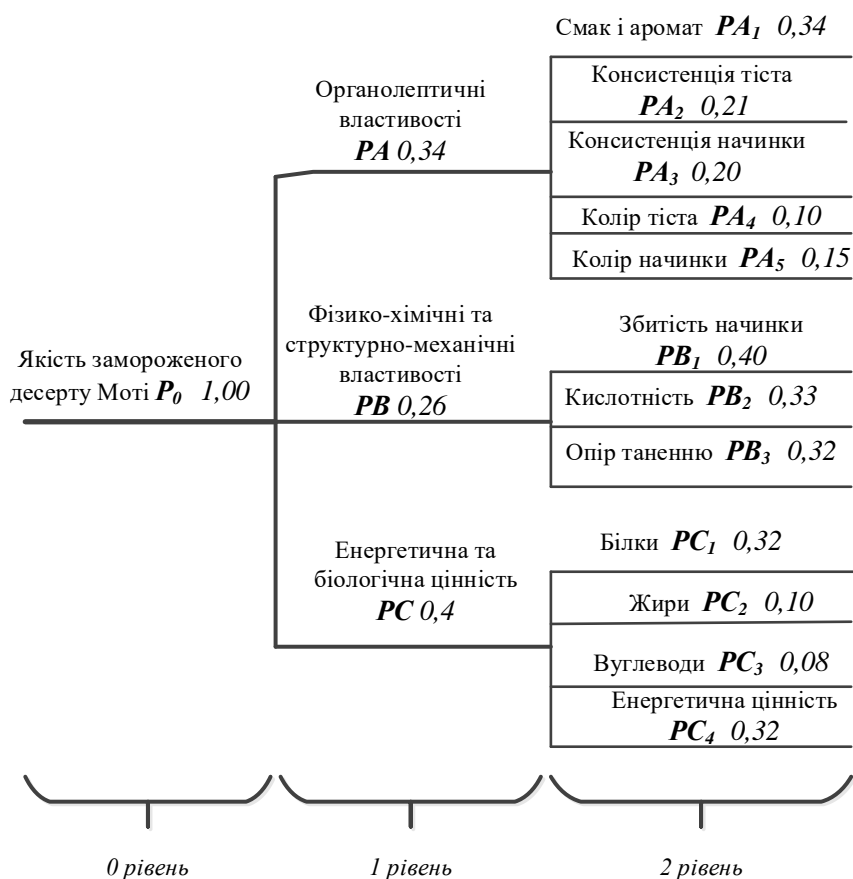


Рис. 1. «Дерево властивостей» замороженого десерту Моті

Оцінювали органолептичні показники якості за 50-ти бальною шкалою.

Бали присвоювалися наступним чином:

- смак і аромат – 6...10 балів;
- консистенція тіста – 6...10 балів;

- консистенція начинки – 6...10 балів;

- колір тіста – 6...10 балів;

- колір начинки – 6...10 балів.

Результати дегустаційної оцінки представлених зразків наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Дегустаційна оцінка заморожених десертів Моті

№ зразка	Найменування зразку	Загальна оцінка
1	Заморожений десерт Моті з вичавками яблук	46,6
2	Заморожений десерт Моті з вичавками чорниці	44,4
3	Заморожений десерт Моті з вичавками яблук та 10 % камеді гуару	48,0
4	Заморожений десерт Моті з вичавками яблук та 20 % камеді гуару	47,6
5	Заморожений десерт Моті ТМ «Motiko»	47,4

Отримані під час дегустаційної оцінки дані свідчать про відмінну якість готових виробів за всіма показниками до складу начинки яких входили яблучні вичавки. Особливо це помітно за використання 10 % камеді гуару в рецептурі тіста для десертів.

Десерти, до складу начинки яких входили чорничні вичавки, мали дещо нижчі оцінки за показниками консистенції, кольору начинки та кольору тіста, що відобразилося на загальній оцінці виробів (табл. 1). Ймовірно, це пов'язано із плинною консистенцією

чорничних вичавок, що проникають у шар сирно-вершкового крему ущільнюючи його структуру. Встановлено також, що внесення камеді гуару дозволяє утримати якісну структуру тіста після багаторазового заморожування і розморожування. Також підтверджене незначне зниження показника кольору тіста з використанням камеді гуару. Проте цим значенням можна знехтувати, адже сіруватий колір тіста за внесення гуарової камеді можна легко виправити використовуючи барвні речовини, у тому числі натурального походження, що широко використовуються в харчовій промисловості.

Для здійснення комплексної оцінки якості отримані дегустаційні дані (табл. 1) враховувалися із використанням коефіцієнтів значимості (рис. 1). Було отримано абсолютні значення показників, які перекладалися у безрозмірні величини з використанням функції бажаності Харрінгтона.

Для оцінки властивостей групи В і С безрозмірними величинами оцінювали одиничні показники, що входять до цих груп (табл. 2). Дані були отримані розрахунковим методом (щодо показників групи РС) та базувалися на даних попередніх досліджень (щодо показників групи РВ).

Таблиця 2

Базові значення одиничних показників групи В і С

Група властивостей	Показник	Одиниця вимірювання	Значення одиничного показника		
			Моті з вичавками яблук	Моті з вичавками чорниці	Моті ТМ «Motiko»
В	РВ <sub>1</sub>	%	85,0	80,0	82,0
	РВ <sub>2</sub>	°Т	21,0	23,0	18,0
	РВ <sub>3</sub>	хв	1080,0	960,0	1080,0
С	РС <sub>1</sub>	г	1,0	0,84	0,9
	РС <sub>2</sub>	г	2,2	2,0	5,0
	РС <sub>3</sub>	г	10,6	10,2	40,3
	РС <sub>4</sub>	ккал	80,0	76,6	219,0

Заморожені десерти Моті можуть споживатися всіма верствами населення. Однак враховуючи, що їх можна віднести до безглютенової продукції, вважали за доцільне при оцінці властивостей групи С брати до уваги потреби в енергії для жінок віком від 18 до 29 років розумової праці, що становить 2450 ккал. Таке рішення було прийняте враховуючи те, що на целіакію та непереносимість глютену страждають переважно жінки зазначеного віку (Afanasiuk et al., 2022). Враховуючи, що десерт Моті не є продуктом щоденного вжитку навіть для людей хворих на целіакію і більше характеризується як ласощі, було запропоновано проводити дослідження харчової цінності припустивши, що буде споживатися 80 г продукту в день. Така маса взята із

урахуванням того, що вага одного виробу становить 40 г. Було висунуте припущення, що людина може з'їсти в день два вироби. Відносні показники якості заморожених десертів Моті наведено в табл. 3.

Групові властивості отриманих продуктів оцінювали з урахуванням відносних величин якості у межах групи та їх коефіцієнту вагомості. Якщо показник мав значення за шкалою функції бажаності від 1,00 до 0,80 – йому присвоювалася оцінка «відмінно»; якщо значення знаходилося у межах 0,80...0,63 – «добре»; 0,63...0,37 – «задовільно»; 0,37...0,20 – «погано»; 0,20...0,00 – «дуже погано» (Antoniuk et al., 2022). Результати оцінки групових властивостей наведено на рис. 2.

## Відносні показники якості замороженого десерту Моті

Одиниця вимірювання	Кі-ті показники якості						Відносні показники якості					
	КОД	Моті з вичавками яблук	Моті з вичавками чорниці	Моті з вичавками яблук та 10% камеді гуару	Моті з вичавками яблук та 20% камеді гуару	Моті ТМ «Motiko»	КОД	Моті з вичавками яблук	Моті з вичавками чорниці	Моті з вичавками яблук та 10% камеді гуару	Моті з вичавками яблук та 20% камеді гуару	Моті ТМ «Motiko»
Бал	РА <sub>1</sub>	48	46	48	48	44	КА <sub>1</sub>	0,96	0,92	0,96	0,96	0,88
Бал	РА <sub>2</sub>	40	39	50	50	50	КА <sub>2</sub>	0,80	0,78	1,00	1,00	1,00
Бал	РА <sub>3</sub>	50	43	50	50	42	КА <sub>3</sub>	1,00	0,86	1,00	1,00	0,84
Бал	РА <sub>4</sub>	48	48	45	43	50	КА <sub>4</sub>	0,96	0,96	0,90	0,86	1,00
Бал	РА <sub>5</sub>	47	46	47	47	50	КА <sub>5</sub>	0,94	0,92	0,94	0,94	1,00
%	РВ <sub>1</sub>	49	40	49	49	45	КВ <sub>1</sub>	0,98	0,80	0,98	0,98	0,90
град	РВ <sub>2</sub>	46	47	46	46	42	КВ <sub>2</sub>	0,92	0,94	0,92	0,92	0,84
хв	РВ <sub>3</sub>	46	46	50	50	50	КВ <sub>3</sub>	0,92	0,92	1,00	1,00	1,00
ккал	РС <sub>4</sub>	340	326	330	320	476	КС <sub>4</sub>	0,69	0,66	0,67	0,65	0,78

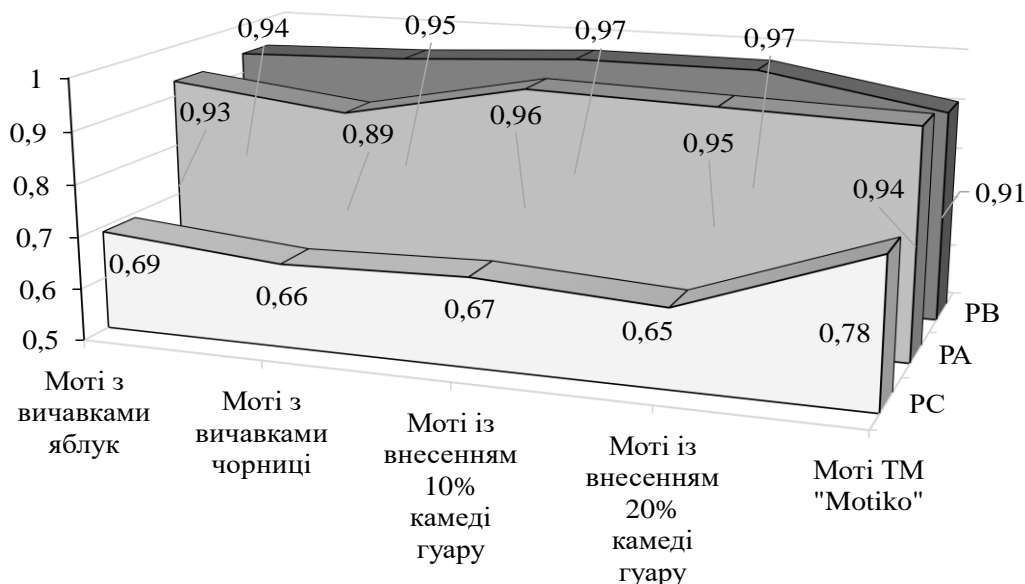


Рис. 2. Модель якості заморожених десертів Моті за груповими властивостями

Згідно з даними комплексної оцінки якості і за наведеною шкалою всі розроблені десерти Моті мають оцінку «відмінно» за органолептичними показниками РА. Це вказує на успішність розробки та доцільність використання вичавок із яблук або

чорниці як плодової складової десертів Моті. Також це говорить про те, що внесення камеді гуару не впливає на органолептичні показники виробів значною мірою. Це вказує на можливе позитивне сприйняття розробленої продукції споживачем.

Дослідження властивостей групи РВ, тобто фізико-хімічних і структурно-механічних показників готової продукції, вказує на відмінну якість заморожених десертів. Слід зазначити, що позитивна характеристика виробів у межах цієї групи зростає із внесенням камеді гуару в рецептуру тіста. Ймовірно, це пов'язано із тим, що тісто у таких виробках не кришиться при багаторазовому заморожуванні і розморожуванні.

При аналізі даних харчової цінності розроблених виробів встановлено, що результати знаходяться в межах оцінки «добре» за шкалою комплексного показника якості. Встановлено, що споживання 80 г продукту покриває добову норму у енергетичній цінності для жінок віком 18...29 років розумової праці на 13,1...13,9 %, тоді як виріб-аналог виробництва ТМ «Motiko» – на 19,4 %. Це не є надто високим значенням. Проте, як зазначалося вище, розроблена продукція більше відноситься до ласощів ніж до продукції щоденного вжитку. Передбачається, що основна кількість спожитих калорій буде надходити із основним раціоном жінки, а Moti будуть лише доповненням до нього. Крім того, встановлено, що вироби за використання у начинці чорничних вичавок мали на 6,1 % меншу калорійність порівняно із виробами, в складі яких містилися яблучні вичавки. Слід наголосити, що тісто для виробів, що порівнювалися, готувалося за використання 100% рисового борошна. Це вказує на нижчу калорійність вичавок чорниці порівняно із вичавками яблук. Скоріш за все, головну роль в цьому відіграє значна кількість харчових волокон у чорничних вичавках та знижена кількість вуглеводів в них. У яблучних же вичавках

міститься більша кількість цукрів, що впливає на калорійність.

Також було встановлено, що внесення у тісто камеді гуару у кількості 10 % або 20 % від маси рисового борошна знижує калорійність виробів на 3,0...6,3 % відповідно.

### **Висновки**

Розроблено «дерево властивостей» заморожених десертів Moti, що включає органолептичні, фізико-хімічні та структурно-механічні властивості, а також харчову та енергетичну цінність десертів. На основі складеного «дерева властивостей» здійснено комплексну оцінку якості заморожених десертів Moti за використання яблучних або чорничних вичавок як плодової компоненти начинки та камеді гуару як стабілізатора структури рисового тіста.

Враховуючи результати викладені в роботі, можна рекомендувати до впровадження у виробництво заморожені десерти Moti, тісто для яких буде містити 10 % камеді гуару від маси рисового борошна. Більша кількість полісахариду не значною мірою покращує структуру тіста, за комплексним показником якості різниця не помітна. При цьому для начинки рекомендовано використовувати як яблучні, так і чорничні вичавки у якості плодового компоненту.

Розроблене «дерево властивостей» в подальшому може використовуватися для комплексної оцінки якості заморожених десертів на основі молочно-плодової сировини за використання різних збагачувальних добавок. Подальші дослідження будуть направлені на усунення сіруватого кольору рисового тіста для десертів Moti за використання камеді гуару.

### **Фінансування / Funding**

Відсутність зовнішнього фінансування / No external funding.

### **Етичне схвалення / Ethical approval**

Не застосовується / Not applicable.

### **Інформована згода / Informed consent**

Не застосовується / Not applicable.

### **Доступність до даних / Availability of data**

Усі дані доступні в цифровому або графічному вигляді в основному тексті рукопису / All data are available in digital or graphical form in the main text of the manuscript.

### Подяка / Acknowledgment

Автори вдячні ТОВ «ТДВ «Полюс Достатку» м. Чернігів, Україна за сприяння проведенню досліджень та промислової апробації результатів / The authors are grateful to LLC "TDV "Polyus Dostatku" Chernihiv, Ukraine for their assistance in conducting research and industrial testing of the results.

### Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені у даній статті / The authors declare that they have no conflict of interest regarding this study, including financial, personal, authorship or other, that could influence the study and its results presented in this article.

### References

Afanasjuk, O. I., Shmalii, V. I., & Yakovets, O. O. (2022). A clinical case of celiac disease in adults. *International scientific journal «Grail of Science»*, (14–15), 584–589. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.27.05.2022.105> (in Ukrainian)

Афанасюк О. І., Шмалій В. І., Яковець О. О. Клінічний випадок целиакії у дорослих. *International scientific journal «Grail of Science»*. 2022. № 14–15. С. 584–589. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.27.05.2022.105>

Antoniuk, I. (2018). Technology of whipped sweet dishes of increased biological value. *Products and markets. The latest technologies of food products*, (2), 146–156 [http://tr.knute.edu.ua/files/2018/02\(26\)/15.pdf](http://tr.knute.edu.ua/files/2018/02(26)/15.pdf) (in Ukrainian)

Антонюк І. Технологія збитих солодких страв підвищеної біологічної цінності. *Товари і ринки. Новітні технології харчових продуктів*. 2018. № 2. С. 146–156. [http://tr.knute.edu.ua/files/2018/02\(26\)/15.pdf](http://tr.knute.edu.ua/files/2018/02(26)/15.pdf)

Antoniuk, O. P., & Melnychuk, Yu. V. (2022). Multi-criteria assessment of the quality of passenger transportation using the psychophysiological scale of desirability. *Modern technologies and prospects for the development of road transport: theses of the XV International science and practice conference / Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia*, 7–9. <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/12/7.pdf> (in Ukrainian)

Антонюк О. П., Мельничук Ю. В. Багатокритеріальна оцінка якості перевезень пасажирів з використанням психофізіологічної шкали бажаності. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту: тези XV Міжнар. наук.-практ. конф / Вінницький національний технічний університет, Вінниця*, 2022. С. 7–9. <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/12/7.pdf>

Kandemir, K., Piskin, E., Xiao, J., Tomas, M., & Capanoglu, E. (2022). Fruit Juice Industry Wastes as a Source of Bioactives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70, 6805–6832. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c00756>

Kolesnikova, M. B., Yurchenko, S. L., Cheremaska, T. V., & Mykolenko, M.A. (2023). Development of technology of frozen desserts using elements of molecular cooking (pacotizing). *Tavriyskyi scientific bulletin. Technical sciences*, (4), 127–136. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.4.16> (in Ukrainian)

Колеснікова М. Б., Юрченко С. Л., Черемська Т. В., Миколенко М.А. Розроблення технології заморожених десертів з використанням елементів молекулярної кулінарії (pacotizing). *Таврійський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. № 4. С. 127–136. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.4.16>

Kowalski, S., & Gumul, D. (2024). The Use of Waste Products from the Food Industry to Obtain High Value-Added Products. *Foods*, 13, 847–853. <https://doi.org/10.3390/foods13060847>

Lapytska, N. V. (2021). Technology of drinks, extracts and concentrates: education. manual. T.H. Shevchenko NUChC. <https://tinyurl.com/yt554us2> (in Ukrainian)

Лапицька Н. В. Технологія напоїв, екстрактів та концентратів: навч. посібник. Чернігів: НУЧК імені Т. Г. Шевченка, 2021. 217 с. <https://tinyurl.com/yt554us2>



Lapytska, N., Syza, O., Gorodyska, O., Savchenko, O., & Rebenok, E. (2023). Improving the jelly plum juice technology by using secondary products of oil production. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/11(123), 68–77. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.281929>

Shydakova-Kamieniuka, O. G., Golovko, M. P., Rogovy, I. S., & Rogova, A. L. (2015). Application of the principles of qualimetry to assess the quality of cookies with the addition of semi-finished bone food. *Progressive equipment and technologies of food production, restaurant business and trade*, (1), 213–222. [https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/1417/1/Pt\\_2015\\_1\\_25.pdf](https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/1417/1/Pt_2015_1_25.pdf) (in Ukrainian)

Шидакова-Каменюка О. Г., Головка М. П., Роговий І. С., Рогова А. Л. Застосування принципів кваліметрії для оцінювання якості печива з додаванням напівфабрикату кісткового харчового. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі*. 2015. № 1. С. 213–222. [https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/1417/1/Pt\\_2015\\_1\\_25.pdf](https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/1417/1/Pt_2015_1_25.pdf)

Stepankova G. V., Oliinyk S. G., Shydakova-Kamieniuka O. G. (2019). Qualimetric evaluation of the quality of wheat bread with the addition of swirling of oat germ and oilcake of maize germ. *Scientific works of the NUHT*, 1(25), 233–242 [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht\\_2019\\_25\\_1\\_24](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2019_25_1_24) (in Ukrainian)

Степанькова Г. В., Олійник С. Г., Шидакова-Каменюка О. Г. Кваліметрична оцінка якості хліба пшеничного з використанням шроту зародків вівса та макухи зародків кукурудзи. *Наукові праці НУХТ*. 2019. № 1(25). С. 233–242. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht\\_2019\\_25\\_1\\_24](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2019_25_1_24)

Received: 28.01.2025. Accepted: 14.02.2025. Published: 03.04.2025.

**Ви можете цитувати цю статтю так:**

Лапицька Н., Рибалочко О., Кавурко Д. Кваліметрична оцінка якості заморожених десертів Моті, виготовлених із використанням побічних продуктів сокового виробництва. *Biota. Human. Technology*. 2025. №1. С. 138-147.

**Cite this article in APA style as:**

Lapytska, N., Rybalochko, O., & Kavurko, D. (2025). Qualimetric evaluation of the Mochi frozen desserts made using by-products of juice production. *Biota. Human. Technology*, 1, P. 138-147. (in Ukrainian)

**Information about the authors:**

**Lapytska N.** [*in Ukrainian: Лапицька Н.*]<sup>1</sup>, Ph.D. in Tech. Sc., Assoc. Prof., email: nadegda.lapitskaja@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-2431-4373  
Department of Chemistry, Technology and Pharmacy, T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”  
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

**Rybalochko O.** [*in Ukrainian: Рибалочко О.*]<sup>2</sup>, student, e-mail: ribalockolena@gmail.com  
ORCID 0009-0008-6643-0480  
Department of Chemistry, Technology and Pharmacy, T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”  
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

**Kavurko D.** [*in Ukrainian: Кавурко Д.*]<sup>3</sup>, student, e-mail: dianakavurko259@gmail.com  
ORCID 0009-0004-2623-8612  
Department of Chemistry, Technology and Pharmacy, T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”  
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

<sup>1</sup> Study design, statistical analysis, manuscript preparation.

<sup>2</sup> Statistical analysis, manuscript preparation.

<sup>3</sup> Data collection, statistical analysis.



Copyright (c) 2025 Anna Helikh

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/).

Анна Геліх

## НИЗЬКОАЛЕРГЕННЕ ПІСОЧНЕ ПЕЧИВО ЗБАГАЧЕНЕ ПОРОШКОМ МАНІОКА ТА АЛЬТЕРНАТИВНИМ БІЛКОМ ДЛЯ ХАРЧУВАННЯ ВІЙСЬКОВИХ



Anna Helikh

### LOW-ALLERGENIC SHORT COOKIES ENRICHED WITH CASSAVA POWDER AND ALTERNATIVE PROTEIN FOR MILITARY NUTRITION

#### АНОТАЦІЯ

Для створення гіпоалергенного пісочного печива досліджено маніок (*Manihot esculenta* Crantz) та ізолят білка равликів (*Helix pomatia*). Маніок містить крохмаль (11,2 %), цукри (4,7 %), волокна (3,8 %) та пігменти. Ізолят равликів (93 % білка) використано як заміну яєць для дієтичного та військового харчування. Мікрохвильова вакуумна сушка маніоку покращила його якість та зберегла антиоксиданти. Мікрохвильова вакуумна сушка маніоку дозволила отримати порошок з підвищеним вмістом крохмалю (43 %), цукрів (18 %), волокон (14,6 %) та збереженими барвниками. У печиві порошок маніоку замінив крохмаль, цукор, барвники та глютен, а ізолят равликів - яйця. У рецептурі використано 38 % маніоку та 3,48 % ізоляту равликів. Пшеничне борошно замінено на 80 % низькоглютенового та 20 % маніокового порошку. У порівнянні зі стандартним пісочним печивом, дослідний зразок продемонстрував збільшення вмісту білка на 24,3 %, досягнувши показника 9,2 г на 100 г продукту. Аналогічно, вміст дієтичних волокон зріс на 74,6 % до 10,3 г/100 г, а вміст золи збільшився на 155,6 %, склавши 2,3 г/100 г. Вміст жиру в пісочному печиві, збагаченому маніоковим порошком та ізолятом білка равликів, зазнав зменшення на 7,5 %, вміст вуглеводів знизився на 11,5 %, а енергетична цінність продукту зменшилась на 8 %, досягнувши 407,8 ккал на 100 г. Текстульні характеристики печива покращилися, що проявилось у зменшенні його твердості на 48 %. При цьому, показники крихкості майже не змінилися, зменшившись лише на 2 % у порівнянні зі звичайним пісочним печивом. Ці зміни зробили печиво з додаванням маніокового порошку та ізоляту білка равликів більш привабливим для споживачів.

**Мета роботи.** Розробка низькоалергенного печива без глютену та яєць, з підвищеним вмістом білка та мінералів, для дієтичного та військового харчування.

**Наукова новизна.** Полягає у визначенні ефективності використання порошку маніоку та ізоляту білка равликів у пісочному тісті.

**Методологія.** Під час проведення роботи використовували фізико-хімічні та органолептичні методи досліджень. Опрацювання результатів здійснювали за допомогою баз даних MS Excel.

**Висновки.** Позитивні зміни у харчовій цінності, текстурі, зниження глютену, підвищення білка та наявність біоактивних компонентів роблять маніок та ізолят равликів перспективними для дієтичного та військового харчування.

**Ключові слова:** альтернативні білки, харчовий барвник, оптимізація рецептури, стандарт якості, військове та дієтичне харчування

#### ABSTRACT

To create hypoallergenic shortbread cookies, cassava (*Manihot esculenta* Crantz) and snail protein isolate (*Helix pomatia*) were studied. Cassava contains starch (11.2 %), sugars (4.7 %), fiber (3.8 %), and pigments. Snail isolate (93 % protein) was used as an egg substitute for dietary and military nutrition. Microwave vacuum drying of cassava improved its quality and preserved antioxidants. Microwave vacuum drying of cassava yielded a powder with increased starch content (43 %), sugars (18 %), fiber (14.6 %), and preserved natural pigments. In the cookies, cassava powder replaced starch, sugar, pigments, and gluten, while snail isolate replaced eggs. The recipe used 38 % cassava and 3.48 % snail isolate. Wheat flour was replaced with 80% low-gluten wheat flour and 20 % cassava powder. Compared to standard shortbread cookies, the experimental sample showed a 24.3 % increase in protein content, reaching 9.2 g per 100 g of product. Similarly, dietary fiber content increased by 74.6 % to 10.3 g/100 g, and ash content increased by 155.6 %, reaching 2.3 g/100 g. The fat content in shortbread cookies enriched with cassava powder and snail protein isolate

decreased by 7.5 %, carbohydrate content decreased by 11.5 %, and the product's energy value decreased by 8 %, reaching 407.8 kcal per 100 g. The cookies' textural characteristics improved, as evidenced by 48 % reduction in hardness. At the same time, the friability indicators remained almost unchanged, decreasing by only 2 % compared to regular shortbread cookies. These changes made cookies with added cassava powder and snail protein isolate more appealing to consumers.

**Objective:** To develop hypoallergenic, gluten-free, and egg-free cookies with increased protein and mineral content for dietary and military nutrition.

**Scientific Novelty:** Determination of the effectiveness of using cassava powder and snail protein isolate in shortbread dough.

**Methodology:** Physicochemical and organoleptic research methods were used during the study. Data processing was performed using MS Excel databases.

**Conclusions:** Positive changes in nutritional value, texture, gluten reduction, protein increase, and the presence of bioactive components make cassava and snail isolate promising for dietary and military nutrition.

**Key words:** alternative proteins, food coloring, recipe optimization, quality standard, military and dietary nutrition

## Постановка проблеми

Дієти на основі рослинної сировини та альтернативних білків стають все більш популярними останнім часом, але харчові продукти на їх основі потребують допрацювання задля зменшення вмісту алергенів (наприклад глютену та яєчних продуктів) та забезпечення споживачів повноцінним білком в тому числі альтернативним. Занепокоєння споживачів щодо їхнього вибору продуктів харчування та їхніх можливих наслідків для здоров'я та навколишнього середовища призвело до помітних змін у моделях харчування та зростаючого переходу до споживання продуктів рослинного походження та альтернативних білків, переважно з метою сприяння здоровому способу життя, збереженню життя тварин та покращення екологічної стійкості (Bresciani & Marti, 2019; Estell et al., 2021; Małeckı et al., 2021; Nychas et al., 2021). Зростаюча обізнаність населення до якості харчових продуктів спонукає харчову галузь до створення нових рецептур та маркування їжі відповідно до її споживчих переваг (органічна, безглютенова, веганська, високопротеїнова їжа і т.п.) перед конкурентами (Shin et al., 2017). Найбільша частка ринку безглютенових та низькоалергенних продуктів припадає на Європу (Le Loan et al., 2021).

Включення порошку маніюки до рецептури та застосування ізоляту білка равликів як заміника яєчних продуктів відкриває нові горизонти для розробки продуктів, що відповідають сучасним вимогам здорового харчування. Порошок маніюки, або тапіоковий крохмаль, слугує цінною безглютеновою основою для

різноманітних страв, особливо для випічки. Його використання дозволяє створювати продукти, придатні для людей з целіакією та для тих, хто просто уникає глютену в раціоні. Порошок маніюки може бути використаний для формування текстури та структури, необхідних у кондитерських виробках, одночасно зменшуючи вміст традиційних алергенів, таких як глютен.

Ізолят білка равликів виступає інноваційним джерелом альтернативного білка, що привертає увагу споживачів, орієнтованих на здоровий спосіб життя та екологічну свідомість. Равлики є ефективним джерелом білка, а їх вирощування вважається більш екологічно стійким порівняно з традиційним тваринництвом. Використання ізоляту білка равликів як заміника яєць усуває з рецептур один з найпоширеніших харчових алергенів – яйця, та дозволяє створювати продукти, збагачені цінним білком. Такий підхід відповідає тенденціям споживання альтернативних білків та сприяє здоровому харчуванню.

Комбінація порошку маніюки та ізоляту білка равликів є особливо перспективною для створення кондитерських виробів, зокрема пісочного печива, орієнтованих на здорове харчування. Використання порошку маніюки як безглютенової основи та ізоляту білка равликів як заміника яєць та джерела білка дозволяє розробляти рецептури, що відповідають зростаючому попиту на низькоалергенні, рослинні та збагачені білком харчові продукти. Ці інновації є особливо актуальними на європейському ринку, де спостерігається значний попит на безглютенові та низькоалергенні продукти харчування, а також зростає інтерес до альтернативних джерел білка та здорового

способу життя. Розробка таких продуктів харчування є важливим кроком у задоволенні потреб споживачів, які прагнуть до здорових та етичних варіантів харчування.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Маніок як бульбовий коренеплід займає 7 місце у світовій статистиці посівів (Sawicka et al., 2020). Маніок (*Manihot esculenta* Crantz) в останні роки набув широкої популярності як здоровий продукт харчування. Маніок визнаний шостою за важливістю культурою у світі (Le Loan et al., 2021). Як основна продовольча культура, маніок став важливою частиною харчування населення планети (Vithu et al., 2019). Завдяки особливостям клімату Центральної Європи, що змінився завдяки впливу глобального потепління, маніок певних сортів можна використовувати на персональних енергонезалежних фермах України (Golovko et al., 2015). Маніок використовується як продовольча та непродовольча сировина в розвинутих країнах (Arianti & Harinta, 2021). Маніок багатий крохмалем, харчовими волокнами, мінералами, вітамінами та речовинами з антиоксидантною активністю (Rath et al., 2016; Van Hal, 2010). Низький вміст білка в маніоку може бути проблемою для його використання в технології збалансованого дієтичного харчування, але це можна вирішити використанням ізолятів білка з високими емульгуючими властивостями (Van Hal M., 2007; Dan Gao et al., 2022). Незважаючи на те, що він є багатим джерелом вуглеводів, він має низький глікемічний індекс (<55), що вказує на його можливість використання в дієтах, згідно рекомендацій ФАО-ВООЗ (Bjorck et al., 2000). Серед сортів маніоку було виявлено значні варіації в складі поживних речовин та різними показниками функціональних властивостей (Hossain et al., 2022; Abegunde et al., 2013). Маніок з різними відтінками кольору м'якоті має різні показники хімічного складу, біологічної цінності та різну кількість біологічно активних речовин у своєму складі (Tang et al., 2015). Маніок з яскраво-кремовою м'якоттю є одним з унікальних сортів бульб маніоку завдяки своїй значній користі для здоров'я у технології хлібобулочних виробів (Oluniyo et al., 2020).

Досліджується використання ізоляту білка нуту в безглютеновому печиві як потенційної заміни традиційних інгредієнтів. Хоча мова у дослідженні іде не саме про ізолят білка равликів, воно демонструє застосування ізоляту рослинного білка в печиві, вивчає його вплив на реологічні властивості тіста та кінцеву якість продукту. Це може бути релевантно для розуміння функціональності ізолятів білка в подібних кондитерських виробках (Sanaz et al., 2018).

Відомі дані про використання ізоляту сироваткового білка та яєчного білка в порошку для 3D-друку харчових продуктів. Розглянуто заміну яєць *ізолятом білка*, і вивчає вплив білкових інгредієнтів на текстуру, мікроструктуру та сенсорні характеристики пісочного печива. Це може бути цінним для розуміння ролі білків в структурі пісочного тіста (Lin et al., 2024).

Часто заміну яєчних продуктів в кондитерських виробках (бісквітному тістечку) здійснюють з використанням ізоляту картопляного білка. Автори досліджують, як ізолят картопляного білка може відтворити функціональні властивості яєць у бісквіті, оцінюючи фізико-хімічні, реологічні та сенсорні характеристики кінцевого продукту. Це дуже релевантна стаття, оскільки вона розглядає заміну яєць ізолятом білка в кондитерському виробі (Kim et al., 2024).

Досліджено використання ізоляту конопляного білка в безглютеновому печиві. Стаття демонструє, як ізолят рослинного білка може бути використаний для покращення поживних та технологічних властивостей печива. Це показує приклад застосування ізоляту білка в печиві для покращення його характеристик (Hedayati et al., 2022).

Звичайні способи випікання кондитерських та хлібобулочних виробів включають запікання на вугіллі та в духовці. Однак ці методи мають багато недоліків, включаючи тривалий час обробки, перегрів поверхні їжі та втрати поживних речовин (Tian et al., 2016; Sakin et al., 2009). Якщо раніше харчові продукти збагачувались різноманітними наповнювачами на основі зернових культур (висівки, зародки та паростки), то з виявленням глютену у пшениці та інших зернових культурах, натуральні наповнювачі почали робити з сухих овочів та протеїнових ізолятів (Liu et al., 2024; Helikh et al., 2021). Досліджені

можливості заміни глютенівмісної сировини іншими інгредієнтами, а також текстуруючими добавками, що підтвержені у існуючих технології кондитерських виробів (Bender Schonlechner, 2020). Виробництво кондитерських виробів пов'язане з використанням різноманітних інноваційних харчових добавок, що містять повноцінний рослинний білок, для задоволення потреб дієтичного (веганського та безглютенового) харчування населення (Gao et al., 2022). Виготовлення безглютенових кондитерських виробів з відповідною еластичністю та когезійністю залишається складною задачею. Продукти без глютену зазвичай мають низьку поживність і нижчі сенсорні та харчові властивості (Abdelsalam et al., 2021). Для підвищення органолептичних властивостей та харчової цінності низькоглютенових харчових продуктів доцільно використовувати харчові добавки багаті на повноцінний білок, такі як протеїновий ізолят (Helikh et al., 2020). Безглютенові кондитерські вироби були доповнені широким спектром добавок, таких як гідроколоїди, підкислювачі, емульгатори, розпушувачі і т.п. (Martínez-Villaluenga et al., 2020). Звичайне борошно, що природно містять глютен може бути деглутиноване за допомогою технологій біопроекти (De Angelis et al., 2010). Однак, у цих композиціях безглютенових виробів відсутні харчові волокна та біоактивні сполуки, які обґрунтовано необхідні для нормальної життєдіяльності організму. Джерелами харчових волокон та золи у кондитерських виробках слугують насіння, шкірка, кісточки, стебла та серцевина фруктів та овочів, які можуть додати біологічну цінність продукту (Horwitz et al., 2006).

*Мета роботи:* визначити ефективність використання порошку маніоку *M. esculenta* отриманого методом мікрохвильової вакуумної сушки та ізоляту білка равликів у рецептурі пісочного тіста, створити нову рецептуру низькоалергенного кондитерського виробу зі зменшенням вмісту глютену та заміною яєчних продуктів, а також із підвищенням вмістом білка та мінеральних речовин, що дозволить використовувати пісочне тісто для дієтичного та військового харчування.

Для досягнення поставленої цілі необхідно:

- провести хімічний аналіз маніоку *M. esculenta*;
- провести хімічний аналіз порошку маніоку *M. esculenta*;
- розробити рецептуру печива збагаченого порошком маніоку та ізолятом білка равликів;
- дослідити хімічний склад печива збагаченого порошком маніоку та ізолятом білка равликів;
- провести аналіз показників текстури (твердість, ламкість) печива збагаченого порошком маніоку та ізолятом білка равликів;
- дослідити органолептичні показники характеристики печива збагаченого порошком маніоку та ізолятом білка равликів.

### Методологія

*Матеріали та сировина для дослідження.* Маніок *M. esculenta* врожаю 2024 року придбаний у фермерському господарстві в Кривому Розі, Україна. Ізолят білка равликів вироблений у Польщі і придбаний через маркетплейс Rozetka. Інші компоненти рецептури пісочного тіста були придбані у місцевих маркетах у місті Суми, Україна. Усі реактиви, використані в експерименті, були аналітичної якості.

*Технологія виготовлення пісочного тіста.* У якості Контролю було обране пісочне печиво, що виготовлене згідно ДСТУ 3781 «Печиво здобне, пісочне, без оздоблення».

*Приготування тіста.* У тістоміс поклали вершкове масло, додали цукровий пісок, меланж, сіль і вимішували 30 хв. до отримання однорідної маси. Потім всипали борошно і продовжували замішувати тісто 2 хвилини. Пісочне тісто повинно мати гладку поверхню без грудочок і слідів поганого вимішування.

*Формування.* Тісто розрізали на шматки по 2 кг і розкочували на столі в пласти. Потім пласти розрізали і качалкою перекладали на листи. Зайве тісто зрізали по краях листа. Перед випічкою поверхню тіста проколювали у кількох місцях, щоб не здувалася. Листи для випічки пісочного тіста не змащували. Тісто для кілець розкачували товщиною 6-10 мм.

*Випічка.* Тривалість запікання кілець при температурі 200-225 °C 10-15 хв.

*Визначення фізико-хімічного складу.* Проаналізовано хімічний склад зразків



маніоку *M. esculenta*, порошку з маніоку *M. esculenta* та пісочного тіста з додаванням порошку маніоку та ізоляту білка равликів, включаючи вимірювання білка, вологи, крохмалю, цукру та золи (Amerine et al., 2013). Вміст жиру аналізували за методом екстракції Сокслета, вміст білка – за методом К'ельдаля, загальний вміст харчових волокон – за допомогою ферментативно-гравіметричного методу (Amerine et al., 2013). Розрахунковим методом визначено енергетичну цінність пісочного тіста в ккал на 100 г.

*Мікрохвильова вакуумна сушка маніоку.* Свіжий маніок промили, почистили і нарізали скибочками діаметром 5 мм і товщиною 2 мм. Скибочки маніока спочатку рівномірно помістили на лоток, а потім у мікрохвильову вакуумну сушарку. Процес сушіння проводили при потужності НВЧ 750 Вт і ступеню вакууму 0,09 МПа. Після сушіння протягом 60 хв потужність мікрохвильової печі перемикали на 450 Вт, щоб продовжити сушіння. Процес сушіння припиняли, коли кінцева вологість скибочок маніока становила менше 6,5 %. Скибочки маніока подрібнювали, пропускали через сито, порошок маніока упаковували в поліетиленовий пакет і зберігали при 25 °С для подальшого використання.

*Структурний аналіз пісочного печива.* Аналіз характеристик текстури: Аналізатор текстури, обладнаний циліндричним зондом (P2), використовувався для визначення твердості та розривності пісочного тіста. Параметри були такими: випробувальна сила з використанням режиму проколу; попередня швидкість і тестова швидкість 1 мм/с; постшвидкість 5 мм/с і тестова відстань 10 мм; зусилля спуску 5,0 г. Для кожного зразка було проведено шість вимірювань і розраховано середнє значення.

*Органолептичні показники.* Десять експертів оцінювали пісочне тісто за методом Score Card для оцінки сенсорних параметрів, а саме: кольору, консистенції, аромату, смаку та загальної прийнятності (Helikh et al., 2020). Метод Score Card (карткова оцінка) є одним із методів сенсорного аналізу, який використовується для кількісної оцінки сенсорних властивостей продукту. Він передбачає

використання спеціально розроблених карток з критеріями оцінки (в даному випадку: колір, консистенція, аромат, смак, загальна прийнятність) та шкалами для їх вимірювання. Експерти, використовуючи ці картки, оцінюють кожен з критеріїв, присвоюючи відповідні бали. Отримані значення від учасників були оцінені за допомогою одностороннього дисперсійного аналізу та виражені як середнє значення.

*Статистичний аналіз.* Результати досліджень виражали у вигляді середнього значення при кількості дослідів  $n=6$  і стандартній похибці  $\alpha < 0,05$ . Повторення дослідів ( $n=6$ ) підвищує надійність результатів. Статистична значущість ( $\alpha < 0,05$ ) підтверджує, що отримані відмінності в сенсорних властивостях тіста є реальними, а не випадковими. Таким чином, представлені статистичні показники свідчать про те, що дослідження було проведено з дотриманням наукової методології, а отримані результати є достовірними та надійними.

*Наукова новизна полягає у том, що уперше досліджена можливість використання у рецептурі пісочного печива порошку маніоку *M. esculenta*, що виготовлений способом мікрохвильової вакуумної сушки, а також можливість повної заміни яєчних продуктів на альтернативний білок – порошок равликів.*

### Результати дослідження

Досліджено хімічний склад маніоку *M. esculenta*, вирощеного в Україні, для визначення його можливостей у технології пісочного печива. Загальний хімічний склад маніоку наведено в табл. 1.

Результати дослідження хімічного складу показали, що маніок *M. esculenta* має високу харчову та біологічну цінність. Це може бути пов'язано з тим, що маніок вирощувався на чорноземах в умовах малого фермерського господарства, що підвищило його харчову цінність. Маніок *M. esculenta* особливо багатий харчовими волокнами (3,8 %), білком (3,6 %) і золою (1,1 %), які мають вирішальне значення в дієтичному та повсякденному харчуванні населення.

Таблиця 1

Хімічний склад маніоку *M. esculenta*

Харчова цінність, г/100г	М'якоть маніоку <i>M. esculenta</i>
Волога	75,5
Крохмаль	11,2
Натуральні цукри	4,7
Харчові волокна	3,8
Білок	3,6
Жир	0,1
Зола	1,1

У технології кондитерських виробів маніок використовують у вигляді порошку. Порошок з маніока виготовляється мікрохвильовою вакуумною сушкою, що є одним з інноваційних методів сушіння овочів. Порошок маніока добре зберігається (до 2 років) при стандартних складських

умовах і має багато способів застосування на харчових підприємствах.

Хімічний склад порошку маніоку *M. esculenta* дозволить розрахувати оптимальну рецептуру кондитерських виробів. Загальний хімічний склад порошку маніоку *M. esculenta* наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Хімічний склад порошку заморожено-розмороженого маніока *M. esculenta*

Харчова цінність, г/100г	Порошок маніока <i>M. esculenta</i>
Волога	6
Крохмаль	43
Натуральні цукри	18
Харчові волокна	14,6
Білок	13,8
Жир	0,4
Зола	4,2

Порошок маніока *M. esculenta* має високі показники біологічної цінності та підходить для заміни цукру та частини пшеничного борошна в рецептурі. Порошок маніока добре підходить для промислового виробництва кондитерських виробів і дозволяє тривалий час зберігати маніок і збільшити його експортний потенціал. Зменшення маси маніоку за рахунок випаровування вологи у 4 рази значно зменшить витрати на його перевезення та зберігання.

Досліджено ефективність додавання порошку маніоку *M. esculenta* та ізоляту білка равликів до рецептури печива. Стандартні рецепти пісочного тіста містять такі алергени, як пшеничне борошно та яєчні продукти. На жаль, порошок маніока не має властивостей, необхідних для повної

заміни глютену в пшеничному борошні, але вміст крохмалю дозволяє провести часткову заміну. Тому, пшеничне борошно в рецепті печива замінено на порошок маніока *M. esculenta* на 20 % (мас./мас.), оскільки така кількість є оптимальною враховуючи кількість крохмалю в маніоку і стандартною для заміни пшеничного борошна порошком коренеплодів у рецептурах кондитерських виробів. Інша частка пшеничного борошна (80 %) замінена на низькоглютенове пшеничне борошно, що дозволяє ще більше зменшити кількість глютену в рецептурі. Ізолят білка равликів підходить для заміни яєчних продуктів, завдяки високій кількості білка (93 %), і мінеральним речовинам, що значно спрощує і покращує рецептуру пісочного печива, що наведена у табл. 3.

**Рецептура пісочного печива, збагаченого порошком маніока та альтернативним білком**

Найменування сировини	Витрата сировини на 1 кг пісочного тіста, г	
	Контроль	Розроблене пісочне печиво
Пшеничне борошно	575	-
Низькоглютенове пшеничне борошно	-	435
Порошок маніоку	-	315
Порошок равликів	-	35
Цукор	180	-
Курячі яйця	35	-
Вершкове масло	200	200
Сіль	20	20
Всього	1010	1005
Вихід пісочного печива, %	97,5	98,5

Розроблена рецептура пісочного печива суттєво змінилася у процентному співвідношенні інгредієнтів, спрямовуючись на зменшення вмісту глютену та збагачення поживними речовинами. Найбільша зміна полягає у різкому збільшенні частки низькоглютенового пшеничного борошна до 43,28 %, що відображає стратегічну заміну традиційного борошна для створення продукту з меншим вмістом глютену. Значною зміною є також введення порошку маніока, частка якого досягла 31,34 %, що підкреслює його важливість як нового збагачувального компонента в рецептурі. У рецептуру було додано ізолят білка равликів, альтернативне джерело білка, атакож для заміни яєчних продуктів, хоча його частка є меншою і становить 3,48 % від загальної маси. Ці процентні зміни підтверджують спрямованість розробленої рецептури на створення продукту зі зниженим вмістом глютену та збагаченого порошком маніока та альтернативним білком.

Кремові відтінки кольору маніока *M. esculenta*, як заміника частини борошна та цукру, вдало поєднуються в рецептурі пісочного печива. Загальна кількість порошку маніока *M. esculenta* в рецептурі становила 315 г, що суттєво вплинуло на органолептичні показники та хімічний склад пісочного печива. Високий вихід пісочного печива (98,5 %), більший за контрольне значення на 1 % пояснюється тим, що значна кількість порошку маніока при його відновленні у тісті при додаванні

води, значно збільшує свій об'єм за рахунок зв'язування вологи.

З метою аналізу якісних характеристик пісочного печива збагаченого порошком маніока та альтернативним білком, було проведено його хімічний та текстурний аналіз. Хімічний склад пісочного печива наведено на рис. 1.

Дані, наведені на рис. 1 свідчать, що після додавання порошку маніока до рецептури пісочного тіста та порошку равликів суттєво змінився його хімічний склад. Порівняно зі звичайним пісочним печивом вміст білка збільшився на 24,3 % до 9,2 г/100 г продукту. Незначне збільшення вмісту білка пов'язане з тим, що яєчні продукти також є джерелом білка, як і ізолят білка равликів. Вміст харчових волокон збільшився на 74,6 % до 10,3 г/100 г продукту та золи на 155,6 % до 2,3 г/100 г порівняно зі звичайним пісочним печивом. Вміст жиру у пісочному печиві з порошком маніока зменшився на 7,5 %, вміст вуглеводів зменшився на 11,5 %, що суттєво вплинуло на енергетичну цінність досліджуваного пісочного печива і вона знизилася на 8 % до 407,8 ккал/100 г продукту. Отримані зміни в харчовій цінності пісочного печива, підтверджують ефективність використання порошку маніоку та золяту білка равликів для дієтичного харчування.

Велика кількість порошку маніоку в рецепті пісочного печива пом'якшило його структуру, що показано в табл. 4.

Після додавання порошку маніоку та ізоляту білка равликів до рецептури пісочного печива консистенція печива покращилася. Його твердість зменшилась на 48 %, порівняно зі звичайним пісочним печивом, завдяки наявності великої кількості рослинної сировини у рецептурі. Ламкість розробленого пісочного печива була знижена лише на 2 % порівняно зі звичайним пісочним печивом, що говорить

про те, що ізолят білка равликів виконав функцію емульгуючу та жирозв'язуючу. Значне зменшення твердості, але при цьому майже однакові показники ламкості, значно покращили текстуру пісочного печива збагаченого порошком маніоку та ізолятом білка равликів. Отримані показники текстури можна пояснити збільшенням вмісту вологи на 10,8 %, білка та харчових волокон у розробленому (рис. 1).

Таблиця 4

Аналіз текстури пісочного печива,  
збагаченого порошком маніока та альтернативним білком

Індикатор текстури	Контроль	Розроблене печиво
Твердість (Hardness), г	278	188
Ламкість (Fracturability), г	320	314

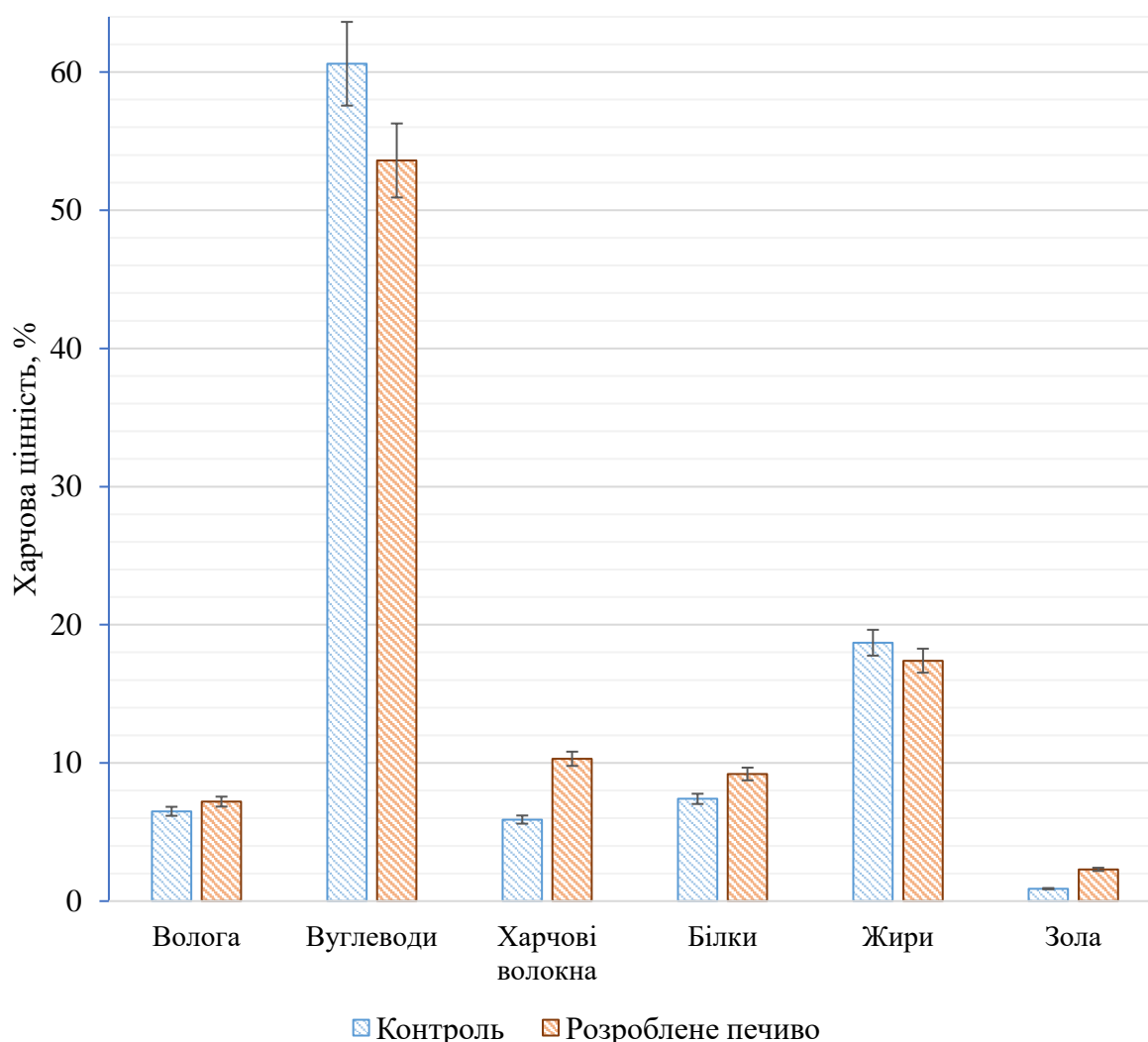


Рис. 1. Хімічний склад пісочного печива з порошком маніока та альтернативним білком

Органолептичні показники за кольором, смаком, консистенцією, запахом і

загальною прийнятністю розробленого пісочного печива наведені на рис. 2.

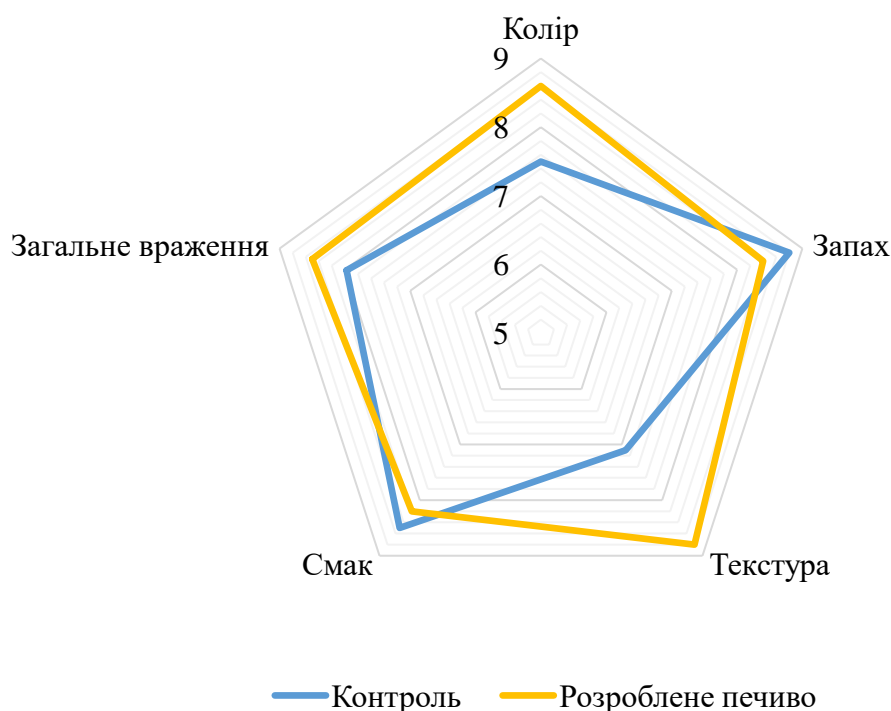


Рис. 2. Органолептична оцінка пісочного печива, збагаченого порошком маніока та альтернативним білком

Результати органолептичної оцінки представлено на рис. 2 як середні значення оцінок після дегустації десятима експертами. Пісочне печиво, збагачене порошком маніока та ізолятом білка равликів, мало вищі бали за текстурою, кольором і загальною прийнятністю порівняно зі звичайним пісочним печивом. Показники запаху та смаку були нижчими, ніж у звичайному пісочному печиві, що пов'язано з високим вмістом рослинної сировини, що значно не вплинуло на загальне враження, що було вище на 6,2 % у розробленого пісочного печива.

Досліджуване пісочне печиво отримало високу оцінку експертів за свій природний помаранчевий колір, який пов'язаний з насиченим помаранчевим кольором маніока *M. esculenta*, який утворився шляхом поєднання пігментації  $\beta$ -каротином шкірочки (помаранчевий) та пігментації  $\beta$ -каротином м'якоті (світло-помаранчевий). Загальна прийнятність печива з порошком маніока та ізолятом білка равликів була на високому рівні, враховуючи, що воно буде використовуватися для дієтичного та військового харчування.

## Висновки

Отримані результати досліджень хімічного складу маніока *M. esculenta* та порошку маніока заморожено-розмороженого висушеного за допомогою методу мікрохвильової вакуумної сушки підтверджують ефективність використання порошку маніока *M. esculenta*. Порошок маніока підходить для використання у якості харчового барвника (кремовий колір) та джерела білка, харчових волокон, крохмалю та мінеральних речовин у виробництві пісочного печива, його додавання сприяло збільшенню вмісту харчових волокон на 74,6 %, а вміст мінеральних речовин на 155,6 %. Заміна яєчних продуктів на ізолят білка равликів також дала свій позитивний ефект і дозволило збільшити вміст білка на 24,3 % при цьому показники текстури стали краще, ніж у Контроля. Незважаючи на повну заміну у рецептурі курячих яєць на ізолят білка равликів, цукру та звичайного пшеничного борошна на порошок маніока та низькоглютене пшеничне борошно, розроблене пісочне печиво отримало високі органолептичні



показники та покращені значення текстури, що пов'язано з якістю порошку маніока отриманого методом мікрохвильового вакуумного сушіння. Напівфабрикати з маніока можна використовувати і в інших рецептурах харчових продуктів де необхідно додати харчовий барвник або натуральний цукор та збагатити їжу рослинним білком, харчовими волокнами та мінеральними речовинами. Високий вміст вітаміну А та  $\beta$ -каротину у маніока та пісочному печиві з його додаванням надає антиоксидантні властивості харчовому продукту і разом зі зменшенням вмісту

глютену та інших алергенів у рецептурі, покращує передумови його використання у дієтичному харчуванні.

Подальші дослідження слід спрямувати на додавання порошку маніоку *M. esculenta* та ізоляту білка равліків у рецептури інших харчових продуктів та провести аналіз зміни кольору харчових продуктів з порошком маніока на професійному обладнанні. Необхідно дослідити більш детально мінеральний та вітамінний склад маніоку *M. esculenta* вирощеного на чорноземах України.

### 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 / Conflicts of Interest

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

## References

- Abdelsalam, R., El-Naggar, E., El-Soukkary, F., & Abdelmeguid, M. (2021). Physico-chemical, functional and antioxidant properties of some flours types as gluten-free ingredients compared to wheat flour. *Asian Journal of Applied Chemistry Research*, 10(3-4), 21-30. <https://doi.org/10.9734/ajacr/2021/v10i3-430238>
- Abegunde, O., Mu, T., Chen, J., & Deng, F. (2013). Physicochemical characterization of sweet potato starches popularly used in Chinese starch industry. *Food Hydrocolloids*, 33, 169-177. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.03.005>
- Arianti, Y., & Harinta, Y. (2021). Sweet Potatoes: Development and potential as alternative food ingredients in Karanganyar Regency, Indonesia. *E3S Web of Conferences*, 226, 00050. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202122600050>
- Bender, D., & Schonlechner, R. (2020). Innovative approaches towards improved gluten-free bread properties. *Journal of Cereal Science*, 91, 102904. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102904>

- Bresciani, A., & Marti, A. (2019). Using Pulses in Baked Products: Lights, Shadows, and Potential Solutions. *Foods*, 139, 113-126. <https://doi.org/10.3390/foods8100451>
- Bjorck, I., Liljeberg, H., & Ostman, E. (2007). Low glycaemic-index foods. *British Journal of Nutrition*, 83(S1), 149-155. <https://doi.org/10.1017/S0007114500001094>
- CIP. (2006). International potato center. Available online: <http://www.cipotato.org>
- Dan, G., Helikh, A., Duan, Z., Shang, F., & Liu, Y. (2022). Development of pumpkin seed meal biscuits. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(11), 36-42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254940>
- Dan, G., Helikh, A., Filon, A., Zhenhua, D., & Vasylenko, O. (2022). Effect of pH-shifting treatment on the gel properties of pumpkin seed protein isolate. *Journal of Chemistry and Technologies*, 30(2), 198-204. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i2.241145>
- De Angelis, M., Cassone, A., Rizzello, C., Gagliardi, F., Minervini, F., Calasso, M., Di Cagno, R., Francavilla, R., & Gobbetti, M. (2010). Mechanism of degradation of immunogenic gluten epitopes from *Triticum turgidum* L. var. *Durum* by sourdough lactobacilli and fungal proteases. *Applied and Environmental Microbiology*, 76, 508-518. <https://doi.org/10.1128/AEM.01630-09>
- Estell, M., Hughes, J., & Grafenauer, S. (2021). Plant protein and plant-based meat alternatives: Consumer and nutrition professional attitudes and perceptions. *Sustainability (Switzerland)*, 13(3), 1-18. <https://doi.org/10.3390/su13031478>
- Golovko, N., Golovko, T., & Gelikh, A. (2015). Investigation of amino acid structure of proteins of freshwater bivalve mussels from the genus *Anodonta* of northern Ukraine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(11), 10-16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51072>
- Hedayati, S., Jafari, S., Babajafari, S., Niakousari, M., & Mazloomi, S. (2022). Different food hydrocolloids and biopolymers as egg replacers: A review of their influences on the batter and cake quality. *Food Hydrocolloids*, 112, 107-131. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107611>
- Helikh, A., Gao, D., & Duan, Z. (2020). Optimization of ultrasound-assisted alkaline extraction of pumpkin seed meal protein isolate by response surface methodology. *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, 31(70), 100-104. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-2/17>
- Helikh, A., Danylenko, S., Kryzhaska, T., & Qingshan, L. (2021). Development of technology and research of quality indicators of yoghurt with natural filler in the preservation process. *Food Resources*, 9(16), 69-78. <https://doi.org/10.31073/foodresources2021-16-07>
- Horwitz, W., & Latimer G. Association of Official Analytical Chemists International. (2006). Official methods of analysis of AOAC International (18th ed., current through rev). AOAC International
- Hossain, M., Rahim, M., Moutosi, H., & Das, L. (2022). Evaluation of the growth, storage root yield, proximate composition, and mineral content of colored sweet potato genotypes. *Journal of Agriculture and Food Research*, 8, 100289. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100289>
- Kim, S., Jung, Y., Lee, H., Mun, J., Kim, S., Song, K., & Seo, H. (2024). Development of plant-based egg-white replacer: Improvement of foaming and thermal properties of plant-based proteins. *LWT*, 52(10), 6331-6340. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116611>

- Lin, H., Huang, L., Tsai, J., & Sung, W. (2024). Effect of Whey Protein Isolate and Soy Protein Isolate on Textural Properties and Syneresis of Frozen Traditional Chinese Hot Pot Egg Sausage Gels. *Gels*, 10(12), 815. <https://doi.org/10.3390/gels10120815>
- Liu, Y., Helikh, A. O., Filon, A. M., Tang, X., Duan, Z., & Ren, A. (2024). Beetroot (*Beta vulgaris* L. var. *conditiva* Alef.) pretreated by freeze-thaw: Influence of drying methods on the quality characteristics. *CYTA-Journal of Food*, 22(1), 1–12. <https://doi.org/10.1080/19476337.2023.2295421>
- Loan, T., Thuy, N., Tri, Q., & Sunghoon, P. (2021). Characterization of gluten-free rice bread prepared using a combination of potato tuber and ramie leaf enzymes. *Food Science and Biotechnology*, 30, 521-529. <https://doi.org/10.1007/s10068-021-00891-2>
- Małecki, J., Muszyński, S., & Sołowiej, B. G. (2021). Proteins in food systems bionanomaterials, conventional and unconventional sources, functional properties, and development opportunities. *Polymers*, 13(15), 2506. <https://doi.org/10.3390/polym13152506>
- Martínez-Villaluenga, C., Penas, E., Hernandez-Ledesma, B. (2020). Pseudocereal grains: Nutritional value, health benefits and current applications for the development of gluten-free foods. *Food and Chemical Toxicology*, 137, 111178. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2020.111178>
- Nychas, G., Sims, E., Tsakanikas, P., & Mohareb, F. (2021). Data Science in the Food Industry. *Annual Review of Biomedical Data Science*, 4(1), 341-367. <https://doi.org/10.1146/annurev-biodatasci-020221-123602>
- Oluniyo, R., Omoba, O., Awolu, O., & Olagunju, A. (2020). Orange-fleshed sweet potatoes composite bread: A good carrier of beta ( $\beta$ )-carotene and antioxidant properties. *Journal of Food Biochemistry*, 45(3), e13423. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13423>
- Rath, D., George, J., Mukherjee, A., Naskar, S. K., & Mohandas, C. (2016). Antibacterial activity of leaf and tuber extract of orange, purple flesh antioxidants rich sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.)). *Merit Research Journal of Agricultural Science and Soil Sciences*, 4(4), 67-71. Available online: <https://meritresearchjournals.org/asss/Content/2016/April/Rath%20et%20al.pdf>
- Sakin, M., Kaymak-Ertekin, F., & Ilicali, C. (2009). Convection and radiation combined surface heat transfer coefficient in baking ovens. *Journal of Food Engineering*, 94(3-4), 344-349. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.03.027>
- Sanaz, S., Mohammad, S., Hossein, K., & Zahra, E. (2018). The Effect of chickpea protein isolate and transglutaminase on batter rheology and gluten-free cookies quality. *LWT - Food Science and Technology*, 69, 471–479. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.12.023>
- Sawicka, B., Pszczołkowski, P., Krochmal-Marczak, B., Barbaś, P., & Özdemir, F.A. (2020). The effects of variable nitrogen fertilization on amino acid content in sweet potato tubers (*Ipomoea batatas* L. (Lam.)) cultivated in central and eastern Europe. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(11), 4132-4138. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10452>
- Shin, D., Hwang, K., Lee, C., Kim, T., Park, Y., & Han, S. (2017). Effect of Swiss chard (*Beta vulgaris* var. *cicla*) as nitrite replacement on color stability and shelf-life of cooked pork patties during refrigerated storage. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 37(3), 418-428. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2017.37.3.418>
- Tang, Y., Cai, W., & Xu, B. (2015). Profiles of phenolics, carotenoids and antioxidative capacities of thermal processed white, yellow, orange and purple sweet potatoes grown in Guilin, China. *Food Science and Human Wellness*, 4(3), 123-132. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2015.07.003>

Tian, J., Chen, J., Lv, F., Chen, S., Chen, J., Liu, D., & Ye, X. (2016). Domestic cooking methods affect the phytochemical composition and antioxidant activity of purple-fleshed potatoes. *Food Chemistry*, 197, 1264-1270. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.049>

Van Hal, M. (2007). Quality of sweet potato flour during processing and storage. *Food Reviews International*, 16, 37-41. <https://doi.org/10.1081/FRI-100100280>

Vithu, P., Dash, S. K., & Rayaguru, K. (2019). Post-harvest processing and utilization of sweet potato: A review. *Food Reviews International*, 35(8), 726-762. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1600540>

**Received:** 19.02.2025. **Accepted:** 18.03.2025. **Published:** 03.04.2025.

**Ви можете цитувати цю статтю так:**

Геліх А. Низькоалергенне пісочне печиво збагачене порошком маніока та альтернативним білком для харчування військових. *Biota. Human. Technology*. 2025. №1. С. 148-160.

**Cite this article in APA style as:**

Helikh, A. (2025). Low-allergenic short cookies enriched with cassava powder and alternative protein for military nutrition. *Biota. Human. Technology*, 1, P. 148-160. (in Ukrainian)

**Information about the author:**

**Helikh A.** [in Ukrainian: **Геліх А.**], Assoc. Prof., Ph.D. in Tech. Sc., email: [anna.helikh@snau.edu.ua](mailto:anna.helikh@snau.edu.ua)  
ORCID: 0000-0003-3769-1231 Scopus Author ID: 57217304277  
Department of Technology and food safety, Sumy National Agrarian University  
160 Kondratieva Street, Sumy, 40021, Ukraine

UDC 664.871:613.2

DOI: 10.58407/bht.1.25.10



Copyright (c) 2025 Alla Bashta, Natalia Stetsenko, Svitlana Bazhay-Zhezherun

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/).**Алла Башта, Наталія Стеценко, Світлана Бажай-Жежерун****ПІДВИЩЕННЯ ХАРЧОВОЇ ЦІННОСТІ ТА РОЗШИРЕННЯ АСОРТИМЕНТУ СОУСІВ  
ОЗДОРОВЧОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

Alla Bashta, Natalia Stetsenko, Svitlana Bazhay-Zhezherun

**INCREASING THE NUTRITIONAL VALUE AND EXPANDING THE RANGE  
OF SAUCES FOR HEALTH****АНОТАЦІЯ**

**Метою** дослідження є підбір плодово-ягідної та пряно-ароматичної композиції з високим вмістом біологічно активних речовин та отримання на її основі соусу оздоровчого призначення.

**Методологія.** Досліджена як традиційна, так і нетрадиційна плодово-ягідна, пряно-ароматична сировина для виробництва соусу оздоровчого призначення.

За загальновідомими методиками у кожному виді сировини визначено вміст біологічно активних речовин: пектинових речовин, біофлавоноїдів, аскорбінової кислоти, каротиноїдів, клітковини, органічних кислот, необхідних для надання готовому виробу оздоровчих властивостей.

Для визначення кількісної оцінки якості готових соусів застосовували комплексний показник, що ґрунтується на методах кваліметрії.

**Наукова новизна.** За вмістом основних біологічно активних речовин, за розробленим комплексним показником якості, запропоновано створення купажної композиції пюре для соусу з поєднанням пряно-ароматичної, лікарської сировини з метою підвищення харчової цінності виробу, надання йому оздоровчих властивостей та створення конкурентоспроможної продукції на ринку.

**Висновки.** У даній роботі досліджено та підтверджено доцільність використання ягідного міксу на основі ягід чорної смородини й вишні та пряно-ароматичної сировини для отримання соусу оздоровчого призначення. Адже за результатами досліджень, як ягоди смородини чорної так і вишні містять значну кількість пектинових речовин, біофлавоноїдів, каротиноїдів, вітаміну С, що підтверджує можливість їх використання для створення функціональних харчових продуктів. За розробленим комплексним показником якості оптимальне співвідношення ягід смородини чорної до ягід вишні у готовому соусі становить 1,5:1 відповідно.

Для додаткового збагачення соусу біологічно активними речовинами, надання приємних органолептичних властивостей, розширення асортименту соусів оздоровчого призначення в якості пряно-ароматичної добавки додавали порошок листя смородини та гісопу лікарського у кількості 0,6 %.

**Ключові слова:** соус, чорна смородина, ягоди вишні, гісоп, оздоровчі продукти

**ABSTRACT**

**The purpose** of the study is to select a fruit and berry and spice flavouring composition with a high content of biologically active substances and to produce a health-promoting sauce from it.

**Methodology.** Both traditional and non-traditional fruits and berries, spices and flavoured raw materials were investigated for the production of a health-promoting sauce.

The content of biologically active substances in each type of raw material was determined using standard methods: pectin substances, bioflavonoids, ascorbic acid, carotenoids, dietary fibers, organic acids necessary to give health properties to the final product.

A complex indicator based on qualimetric methods was used to quantitatively assess the quality of the finished sauces.

**Scientific novelty.** According to the content of the main biologically active substances, according to the developed complex quality indicator, it is proposed to create a puree-mix composition for sauce with a combination of spicy-



flavoured medicinal raw materials. This is done in order to increase the nutritional value of the product, give it health properties and create competitive products on the market.

**Conclusions.** In this study, the feasibility of using a berry mixture based on blackcurrants and cherries and spicy and aromatic raw materials to produce a health-promoting sauce was investigated and confirmed. According to the research results, both blackcurrants and cherries contain a significant amount of pectin substances, bioflavonoids, carotenoids and vitamin C, which confirms the possibility of their use for the production of healthy food. According to the comprehensive quality indicator developed, the optimum ratio of blackcurrants to cherries in the finished sauce is 1.5:1.

In order to additionally enrich the sauce with biologically active substances, give it pleasant organoleptic properties and expand the range of healthy sauces, blackcurrant leaf powder and hyssop powder were added as a spice and flavouring additive in an amount of 0.6 %.

**Keywords:** sauce, blackcurrant, cherry berries, hyssop, health products

## Постановка проблеми

Забезпечення оптимального стану харчування населення є однією з актуальних проблем, оскільки саме харчування виступає важливим чинником, від якого значною мірою залежить формування здоров'я окремої людини та нації загалом. В Україні проблема раціонального харчування набуває особливої гостроти у зв'язку із зниженням рівня життя населення, несприятливими екологічними умовами, постійними дистресовими станами, що неухильно зростають через воєнні дії в нашій країні. В результаті неповноцінного, незбалансованого харчування відбувається порушення обміну речовин, зростає захворюваність населення на розлади харчування та ендокринні хвороби, спостерігається виразна тенденція до набирання зайвої маси тіла та поширення ожиріння, хвороб системи кровообігу, онкологічних захворювань.

Дефіцит в раціонах харчування біологічно активних речовин, які суттєво впливають на обмінні процеси в організмі людини, потребує пошуку нетрадиційних сировинних джерел з високою біологічною цінністю, розробки нових та вдосконалення існуючих технологій виробництва харчових продуктів, що знаходять застосування в повсякденному раціоні харчування людини і здатні розширити асортимент оздоровчих харчових продуктів за своїм складом та харчовою цінністю.

Серед харчових продуктів у щоденному раціоні людини важливе місце належить соусам. Їх можна використовувати у звичайному харчуванні, вони популярні у закладах ресторанного господарства завдяки своїй універсальності, можливості контролювати хімічний склад та калорійність. Однак в асортименті соусної продукції України переважають

соуси на емульсійній і томатній основі, гірчиці. Водночас постійно ведуться розробки нових видів емульсійних соусів багатофункціонального призначення, в основу яких можуть бути введені різноманітні компоненти із плодів та овочів. Сегмент таких плодово-ягідних соусів, незважаючи на розширення за останні роки, усе ще залишається незначним (Zhukevych & Rudavska, 2012; Lystopad, 2021).

Перспективним напрямком розширення асортименту соусів оздоровчого призначення, підвищення їх харчової цінності, вирішення проблеми збалансованого харчування, можна вважати виробництво соусів з використанням рослинної сировини, зокрема плодово-ягідної, пряно-ароматичної, лікарської, що володіє широким спектром біологічно активних речовин (БАР). А пошук і дослідження джерел сировини, яка б мала підвищений вміст БАР, в тому числі що виявляють антиоксидантну активність є актуальною задачею.

## Огляд останніх досліджень і публікацій

Споживачі мають все більш високі вимоги щодо смаку, кольору і текстури харчових продуктів; вони очікують, що наступні будуть також безпечними і оздоровчими, а також максимально готовими до вживання продуктами, зокрема такими як соуси (Guemouni, 2023). Зацікавленість, як споживачів так і виробників щодо соусної продукції обумовлена також тим, що комбінуванням сировинних компонентів можна розширювати асортимент соусів, регулювати хімічний склад, харчову, біологічну та енергетичну цінність, ціну готового продукту. З кожним роком соуси набувають все більшого значення під час виготовлення та споживання багатьох

страв, доповнюють їх смак та аромат, додають соковитості, збуджують апетит і підвищують засвоюваність страв.

Однак традиційні технології соусів характеризуються низьким вмістом біологічно активних речовин та незбалансованим хімічним складом. Аналіз літератури свідчить, що більшість інновацій у технологіях соусів припадає на томатні соуси та майонези. У той час як технології виробництва соусів на плодово-ягідній основі, на сьогодні представлені переважно за рахунок використання різних смакових наповнювачів та нових структуроутворюючих інгредієнтів (Deinychenko et al., 2018). А ринок таких соусів на сьогодні в Україні все ще представлений в значній мірі імпортною продукцією високого цінового сегменту (Zhukevych & Rudavska, 2012).

В даному науковому спрямуванні, розробленні інноваційних соусів, в тому числі функціонального призначення, вагомий внесок здійснили вітчизняні та зарубіжні вчені: Малюк Л.П., Гринченко О.О., Тележенко Л.М., Кравченко М.Ф., Хомич Г.П., Дейниченко Г.В., Пивоваров П.П., Балацька Н.Ю., Листопад Т.С., Draget K.I. та інші.

Пріоритетним у вирішенні проблеми забезпечення якісного харчування населення є збагачення раціону овочами, плодами, ягодами та продуктами їх переробки. Тому рядом вчених досліджені технології солодких соусів з плодово-ягідної сировини з метою розширення асортименту та підвищення харчової цінності продуктів. Зокрема розроблені ягідні соуси на основі ягід малини та бузини (Balaskaia, 2011); соуси з використанням кизилу, журавлини, обліпихи, чорниці та калини, що у великій кількості вирощуються на території України (Deinychenko et al., 2020; Deinychenko et al., 2019); з використанням хеномелесу – культури, представника роду айвових (Khomych et al., 2016).

Отримати соуси з підвищеним вмістом БАР та високими органолептичними показниками можливо також шляхом застосування ароматичних рослинних добавок. Основою чинником у їх виборі залишається здатність впливу на формування кольору і аромату продукту та наявність високого вмісту аскорбінової кислоти (вітаміну С), поліфенольних сполук тощо (Balaskaia, 2011).

Необхідно підкреслити, що актуальним є і подальше розроблення соусів з

підвищеним вмістом БАР, розширення їх асортименту, з використанням нетрадиційної сировини, поєднанням ягідної, пряно-ароматичної, лікарської сировини.

Метою даної роботи стало розроблення соусу оздоровчого призначення на основі ягідного міксу, що характеризується високим вмістом біологічно-активних речовин, з використанням пряно-ароматичної сировини – листя смородини чорної та гісопу лікарського.

### Матеріали і методи

У процесі досліджень вихідної сировини, напівфабрикатів та готового продукту – ягідного соусу оздоровчого призначення, використовували загальноприйняті методи досліджень, серед яких титриметричні, фотоколориметричні, рефрактометричні, органолептична оцінка (Ahouagi et al., 2021; Kondratenko et al., 2008). Із використанням стандартних методик у кожній із них визначено вміст основних біокомпонентів, необхідних для отримання оздоровчого соусу.

Так, вміст пектинових речовин (ПР) визначали гравіметричним методом, який ґрунтується на визначенні масової частки пектинової кислоти за масовою кількістю пектату кальцію, що утворюється в результаті взаємодії за певних умов хлориду кальцію з пектиновою кислотою (Chandel et al., 2022; Kurz et al., 2008).

Визначення масової частки клітковини ґрунтується на розкладанні всіх інших органічних речовин концентрованою азотною кислотою в суміші з оцтовою і трихлороцтовою кислотами (Kurz et al., 2008; Bashta et al., 2015).

Антиоксидантний ефект плодово-ягідної та пряно-ароматичної сировини зумовлений наявністю у них значної кількості речовин фенольної природи, аскорбінової кислоти, каротиноїдів. Виходячи з цього, було проведено дослідження загального вмісту біофлавоноїдів з використанням реактиву Folin-Ciocalteu спектрофотометричним методом (Kondratenko et al., 2008; Kuzmyk et al., 2017).

Кількісний вміст каротиноїдів, визначений спектрофотометричним методом, вміст органічних кислот визначали йодометричним методом, який заснований на реакції тіосульфату натрію з йодом, що виділився в результаті взаємодії вільних органічних кислот з нейтральним розчи-

ном йодид-йодату калію та вміст вітаміну С з використанням 2,6-дихлорфеноліндофеноляту натрію (Kondratenko et al., 2008; Vishnikin et al., 2019; Malyugina et al., 2013). Дослідження органолептичних та фізико-хімічних показників проведено за вимогами ДСТУ 6087:2009 Консерви. Соуси фруктові. Технічні умови.

Оцінка та розрахунки харчової та біологічної цінностей продукту проводились в табличному редакторі Excel.

Для визначення кількісної оцінки якості готових соусів застосовували комплексний показник, що ґрунтується на методах кваліметрії (Stepankova et al., 2019; Azgaldov & Kostin, 2011). У загальний комплексний показник якості увійшли такі групи показників: органолептична оцінка, фізико-хімічні показники та вміст пектинових речовин, біофлавоноїдів, вітаміну С у готових напоях.

### Результати досліджень

Одним з основних завдань сучасних тенденцій розвитку харчового виробництва та потреб споживачів, є розробка продукту на натуральній основі без додавання структуроутворювачів, консервантів, підсилювачів смаку й аромату. У технологіях фруктово-ягідних соусів як структуроутворювачі здебільшого використовуються загущувачі – крохмалі, камеді, пектинові речовини тощо (Lystopad, 2021; Mandala et al., 2004). На сьогодні існує ряд розробок із заміни традиційних загущувачів у виробництві соусної продукції із застосування модифікацій крохмалів та композиційних сумішей (Andreeva & Kolesnikova, 2017; Bhupinder Kaur et al., 2012). Крім того, є ряд досліджень, які доводять доцільність використання загущувачів некрохмальної природи та пектинових речовин як структуроутворювачів (Dipjyoti & Suvendu, 2010; Cho et al., 2012).

Плодово-ягідна сировина містить значну кількість пектинових речовин, що здатні виявляти структуроутворюючий вплив (Gramza-Michałowska et al., 2019; Bashta et al., 2021; Liu et al., 2015). Відомі дослідження, де не проводили додаткове

введення згущувачів до рецептур ягідних соусів, а отриманий продукт, характеризується натуральністю та легкозасвоюваністю. Доведено можливість виготовлення ягідних соусів з використанням водоростевої сировини без додаткового введення структуроутворювачів (Lystopad, 2021). Отримані також соуси з ягідної сировини бажаної консистенції з додаванням салепу (порошок бульбокорінь зозулинцю) (Balackaya, 2011).

Крім цінних технологічних властивостей пектинових речовин, невід'ємною характеристикою плодово-ягідної продукції призначеної як для споживання у свіжому вигляді так і отримання напівфабрикатів та готових виробів є кількість біологічно активних речовин, зокрема р-активних речовин, каротиноїдів, аскорбінової кислоти (вітаміну С), органічних кислот (Simakhina et al., 2024).

Виходячи з вищесказаного, першочерговим завданням наших досліджень стало створення композиції ягідного міксу, який характеризується високим вмістом зазначених біологічно активних речовин, та отримання на його основі соусу оздоровчого призначення. Для оцінки плодово-ягідних культур, найбільш придатних у технологіях отримання соусу оздоровчого призначення, була досліджена найбільш доступна, як культивована так і дикоросла сировина: яблука, слива, вишня, смородина чорна, смородина червона, чорниця, журавлина, аронія чорноплідна, терен, калина, агрус, дереза, бузина. Усі зазначені культури широко розповсюджені на території України та здавна використовуються у раціонах харчування населення, а також у народній та офіційній медицині для попередження і лікування неспецифічних захворювань.

Оскільки біологічно активні речовини плодово-ягідної сировини мають важливе значення для нормального функціонування організму та враховуючи наведені вище міркування щодо технологічних переваг сировини у виробництві соусної продукції, визначали наступні зазначені біокомпоненти, зведені у табл. 1.

Таблиця 1

**Експериментальні дані визначення вмісту основних цінних біокомпонентів  
плодово-ягідної сировини**

Дослідні зразки	СР, %	Пектинові речовини, %	Біофлавоноїди, мг %	Каротиноїди, мг %	Вітамін С, мг %	Клітковина, %	Органічні кислоти, %
Яблука	15,3	1,3	117	0,7	20	0,6	0,9
Слива	14,6	1,2	630	3,6	18	0,5	2,0
Вишня	14,0	0,8	1350	2,6	65	0,5	1,2
Черешня	14,5	0,8	1230	2,5	62	0,3	0,8
Смородина чорна	13,5	1,1	1840	3,9	201	3,0	1,8
Порічка червона	13,2	0,6	1276	3,2	52	2,5	2,2
Агрус	15,0	1,0	829	3,1	61	2,0	3,1
Чорниця	13,0	0,3	1985	1,3	57	2,6	0,9
Журавлина	11,2	0,7	975	0,9	34	2,0	3,1
Аронія чорноплідна	18,3	0,6	2530	3,8	104	3,1	1,1
Терен	17,3	0,9	810	1,6	35	1,3	2,8
Калина	14,0	0,8	1328	2,4	42	1,9	1,2
Бузина	16,4	0,9	2379	1,5	59	3,7	1,6
Дереза	17,7	0,4	1625	3,9	70	4,4	1,8

З табл. 1 можна зробити висновок, що кожен вид плодів чи ягід, має свої цінні біологічно активні речовини, якими може бути збагачена харчова продукція. Доцільним є не тільки розширення сировинної бази нетрадиційної сировини, а й створення купажних сумішей для соусу з метою забезпечення його більш цінного вмісту БАР. На наш погляд, вибір рослинних матеріалів має ґрунтуватися на кількісних та якісних співвідношеннях комплексу БАР, синтезованих у них природою, органолептичних та технологічних властивостях зразків пюре плодово-ягідної сировини, найбільш придатних для виготовлення соусу.

Аналіз таблиці 1 дає можливість охарактеризувати кожен культуру з погляду відповідності вищезазначеним чинникам, а саме які види з досліджуваних зразків плодів та ягід мають високий вміст визначених біологічно активних речовин: пектинових речовин, біофлавоноїдів, каротиноїдів, аскорбінової кислоти, клітковини. Адже всі ці біологічно активні речовини плодово-ягідної сировини мають важливе

значення для нормального функціонування організму.

Зокрема поліфенольні сполуки нормалізують обмін холестерину, запобігають накопиченню шкідливих вільних радикалів у тканинах організму, підвищують його стійкість до інфекційних захворювань і несприятливих зовнішніх дій. Саме ці сполуки, що містяться у плодах та ягодах в комплексі з вітаміном С дають змогу уникнути багатьох захворювань, нормалізують проникність капілярів, підтримують еластичність стінок, зменшують вірогідність внутрішнього крововиливу (Gramza-Michałowska et al., 2019; Saura-Calixto et al., 2007; Scalbert et al., 2005; Battino et al., 2009).

Каротиноїдам притаманні проти-запальні та ранозагоюючі властивості, вони регулюють процеси обміну речовин, діють як фотопротектори й антиоксиданти, на молекулярному та клітинному рівні запобігають мутагенезу та канцерогенезу, мають позитивний вплив під час патогенних станів, що викликані радіацією. Окремі каротиноїди (зеаксантин і лютеїн) є невід'ємним елементом сітківки та криш-

талика ока. Епідеміологічні дослідження засвідчили пряму залежність ризику розвитку вікової дегенерації сітківки та катаракти від вмісту цих каротиноїдів у сироватці та порушень їх надходження з їжею (Battino et al., 2009; Bunea, 2008).

Крім цінних технічних властивостей пектинових речовин, спектр їхньої біологічної дії широкий. Пектини здатні виводити з організму важкі метали, біогенні токсини, ксенобіотики, продукти метаболізму.

Клітковина покращує процес травлення, стимулює перистальтику, збільшує швидкість проходження їжі через шлунково-кишковий тракт, поглинає жири, токсини із шлунку і кишечника (Liu et al., 2015; Bashta et al., 2015).

Відбір наших зразків ґрунтувався на виборі саме тих плодів та ягід, які перш за все мають високий вміст пектинових речовин, забарвлювальних речовин при високому вмісті всіх інших визначених біокомпонентів (табл. 1). Нашим завданням також було підібрати рослину сировину, яка не лише багата на зазначені біологічно активні речовини, а й має оптимальні органолептичні властивості для приготування соусу, роблячи його привабливим для споживача.

Слива, яблука, чорна смородина, агрус мають високий вміст пектинових речовин (табл. 1). Високий вміст біофлавоноїдів має наступна сировина: чорна смородина, аронія чорноплідна, дереза, бузина, чорниця, вишні. При цьому чорниця, дереза, аронія чорноплідна має вміст пектинових речовин в межах 0,3% – 0,6 %. Комплексно, один з найвищих вміст БАР, а саме пектинових речовин, біофлавоноїдів, каротиноїдів та аскорбінової кислоти (табл. 1) в ягодах

смородини та значний у ягодах вишні, калині, бузині. В даній роботі для отримання соусу оздоровчого призначення були обрані ягоди смородини та вишні. При цьому на вибір ягід вишні вплинули також приємні органолептичні властивості, якими ці ягоди володіють і приваблюють споживача (Wu & Melnyk, 2022).

Для створення композиції ягідного міксу з ягід чорної смородини та вишні, оптимального поєднання органолептичних показників обраної ягідної сировини, із максимальним вмістом пектинових, біофлавоноїдів, вітаміну С, каротиноїдів розробляли комплексний показник якості. Кількісна оцінка якості, як правило, здійснюється не за всіма можливими показниками, які характеризують властивості продукції, а за кількома найбільш значущими, визначальними показниками. При оцінюванні якості продукції переважно досліджуються ті показники, які характеризують здатність продукції «задовольняти певні потреби до її призначення».

Нами здійснено вибір групових та одиничних властивостей, необхідних і достатніх для побудови ієрархічної структури показників якості ягідного соусу, що оцінювалось такими показниками: органолептична оцінка (зовнішній вигляд –  $M_1$ , колір –  $M_2$ , консистенція –  $M_3$ , смак і запах –  $M_4$ ); харчова цінність (вміст ПР –  $M_5$ , вміст біофлавоноїдів –  $M_6$ , вміст вітаміну С –  $M_7$ ).

Визначення коефіцієнтів вагомості даних показників відбувалось експертним методом Делфі. Вагомості всіх властивостей, зв'язані між собою так, що сума вагомостей завжди залишається постійним, наперед заданим числом,  $\sum M_i = 1$  (табл. 2).

Таблиця 2

Розрахунок коефіцієнтів вагомості

Експерти	Коефіцієнт вагомості $M_i$ показника властивостей						
	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$	$M_7$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,1	0,05	0,15	0,2	0,2	0,15	0,15
2	0,15	0,05	0,15	0,2	0,15	0,15	0,15
3	0,1	0,05	0,1	0,2	0,2	0,2	0,15
4	0,1	0,1	0,1	0,15	0,2	0,15	0,2
5	0,1	0,1	0,2	0,25	0,15	0,1	0,1
Середнє значення	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,15	0,15



Соуси представляють собою протерту ягідну масу, уварену з цукром.

Соусні зразки розроблені у різних співвідношеннях ягід смородини та вишні, з додаванням цукру в кількості 20 % від початкової маси ягідної сировини наведено в табл. 3. Приготування соусу складається з таких основних етапів: приготування пюре,

підготовка пряно-ароматичної добавки, купажування, термообробка та охолодження продукції.

У табл. 3 наведено результати визначення абсолютних показників якості досліджуваних соусів та зазначені базові значення (максимальні значення показників для соусу із обраної сировини).

Таблиця 3

Результати визначення абсолютних показників досліджуваних соусів

№ експерименту	Соусні зразки розроблені у різних співвідношеннях ягід смородини та вишні	Органолептичні показники, бал (максимально 5)				Вміст ПР, % (максимально 1,1 %)	Вміст біофлавоноїдів, мг% (максимально 170 мг%)	Вміст вітаміну С, мг% (максимально 70 мг%)
		Зовнішній вигляд	Колір	Консистенція	Смак і запах			
1	50 % ягоди чорної смородини, 50 % ягоди вишні	5	5	4,9	4,9	0,95	159,8	53,2
2	60 % ягоди чорної смородини, 40 % ягоди вишні	5	5	5	5	0,99	166,3	59,6
3	40 % ягоди чорної смородини, 60 % ягоди вишні	4,9	5	4,6	4,9	0,91	154,2	47,8
4	70 % ягоди чорної смородини, 30 % ягоди вишні	4,9	4,9	5	4,6	1,01	168,1	64,0
5	30 % ягоди чорної смородини, 70 % ягоди вишні	4,9	5	4,6	4,8	0,88	149,4	43,3

Розрахунок комплексного показника якості проводився за формулою:

$$K = M_1 \cdot \frac{P_1}{P_1^6} + M_2 \cdot \frac{P_2}{P_2^6} + M_3 \cdot \frac{P_3}{P_3^6} + M_4 \cdot \frac{P_4}{P_4^6} + M_5 \cdot \frac{P_5}{P_5^6} + M_6 \cdot \frac{P_6}{P_6^6} + M_7 \cdot \frac{P_7}{P_7^6}$$

де  $M_1$  – коефіцієнт вагомості показника, що характеризує зовнішній вигляд;

$M_2$  – коефіцієнт вагомості показника, що характеризує колір;

$M_3$  – коефіцієнт вагомості показника, що характеризує консистенцію;

$M_4$  – коефіцієнт вагомості показника, що характеризує смак і запах;

$M_5$  – коефіцієнт вагомості показника, що характеризує вміст пектинових речовин;

$M_6$  – коефіцієнт вагомості показника, що характеризує вміст біофлавоноїдів;

$M_7$  – коефіцієнт вагомості показника, що характеризує вміст вітаміну С;

$P_1^b, P_2^b, P_3^b, P_4^b$  – балова оцінка базових органолептичних показників;

$P_5^b$  – базове значення вмісту пектинових речовин;

$P_6^b$  – базове значення вмісту біофлавоноїдів;

$P_7^b$  – базове значення вмісту вітаміну С;

$P_1, P_2, P_3, P_4$  – балова оцінка одиничних органолептичних показників для всіх зразків;

$P_5$  – значення одиничного показника вмісту пектинових речовин для всіх зразків;

$P_6$  – значення одиничного показника вмісту біофлавоноїдів для всіх зразків;

$P_7$  – значення одиничного показника вмісту вітаміну С для всіх зразків.

Результати розрахунків наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Значення комплексного показника якості комбінованого соусу в залежності від різного співвідношення ягідного пюре

Номер зразка експерименту з табл.3	1	2	3	4	5
Комплексний показник якості	0,922	0,954	0,89	0,949	0,867

Шкала оцінювання диференціюється таким чином: дуже добре – відмінно (1,00...0,80); добре (0,80...0,63); задовільно (0,63...0,37); погано (0,37...0,20); дуже погано (0,20...0,00). Відзначається, що всі зразки мають оцінку «відмінно». Найвищий комплексний показник якості 0,954 має зразок 2, за рахунок оптимального поєднання органолептичних показників із максимальним вмістом пектинових речовин, біофлавоноїдів та вітаміну С. Отже оптимальне співвідношення ягід чорної смородини до ягід вишні становить 1,5:1 відповідно.

Додатково збагатити соуси БАР, надати приємних органолептичних властивостей, розширити асортимент соусів оздоровчого призначення, можна шляхом застосування пряно-ароматичної, лікарської сировини.

Здавна пряно-ароматичні рослини широко використовують у різних галузях життєдіяльності людини, а найбільш часто в кулінарії, в народній і традиційній медицині при різних захворюваннях і для їх профілактики. Адже біологічна цінність

пряно-ароматичної рослинної сировини визначається вмістом широкого спектра БАР: вітамінів, мінеральних речовин, глікозидів, фенольних сполук, ефірних олій. Ці речовини покращують кулінарні якості продуктів, збуджують діяльність смакових і травних органів, викликають апетит, сприятливо впливають на обмін речовин, діяльність нервової та серцево-судинної систем і на загальний стан людини. Багатьом пряно-ароматичним рослинам притаманні консервувальні, антисептичні та бактерицидні властивості (El Babili et al., 2013).

Перспективною нетрадиційною доступною пряно-ароматичною сировиною з високими антиоксидантними властивостями є гісоп лікарський (*Hyssopus officinalis* L.) та листя чорної смородини (*Ribes nigrum* L.). Головними критеріями під час вибору нами даної рослинної сировини стали її хімічний склад, фізіологічна дія, доступність і сумісність при одночасному використанні. Враховано, що обрані види рослин мають оригінальні органолептичні властивості та широко розповсюджені на території України.

Відомо, що листя смородини є полівітамінною сировиною. Крім флавоноїдів, вітаміну С, листя чорної смородини містять ефірну олію, яка обумовлює приємний запах, а також має протизапальну дію.

Гісоп лікарський (*Hyssopus officinalis* L.) – цінна пряно-ароматична, лікарська та ефіроолійна рослина, яка належить до родини Губоцвіті (*Lamiaceae*). Останнім часом гісоп дедалі частіше культивують у різних регіонах України. Найбільші за площею плантації цієї рослини зосереджені на Півдні та Заході України, хоча все частіше можна зустріти культивування гісопу лікарського у зоні Лісостепу та Полісся (Kotyuk, 2013). Відомо, що у фазі цвітіння надземна маса гісопу лікарського

містить від 0,36 до 1,3 % ефірної олії, флавоноїди, тритерпенові кислоти, дубильні речовини, камедь, вітамін С, каротиноїди й інші цінні речовини. Крім того, рослинна сировина гісопу за вмістом деяких мінеральних елементів, зокрема калію, незначно поступається овочевим культурам. Молоді листки, стебла гісопу, що починають цвісти, мають терпкий пряний гіркуватий смак і приємний аромат, використовуються як прянощі. Використання зелені гісопу в їжу сприяє травленню, підвищує апетит, тонізує організм, діє як загальнозміцнювальний засіб (Kotyuk, 2013; Golota & Bashta, 2024).

Визначено основні БАР обраної пряно-ароматичної сировини (табл.5).

Таблиця 5

**Вміст БАР у досліджуваних порошках пряно-ароматичної сировини, висушених за температури 60 °С**

Дослідний зразок	Вміст поліфенольних сполук, мг%	Вміст вітаміну С, мг%	Вміст каротиноїдів, мг%
Порошок з листя чорної смородини	1239	223	2.9
Порошок з гісопу лікарського	986	151	2.1

З експериментальних досліджень видно, що дана сировина містить високий вміст поліфенольних сполук, вітаміну С та каротиноїдів. Відомі розробки, де внесення ароматичної сировини у ягідні пюре дозволяє істотно убезпечити поліфенольні речовини від окисного руйнування, а ягідні системи з додаванням ароматичної сировини відрізняються інтенсивним кольором та смаком, що властиві обраним ягодам. Отриманий ефект вчені пояснюють високою антиоксидантною активністю ароматичної сировини завдяки високому вмісту аскорбінової кислоти, поліфенолів та інших БАР, зокрема флавонолових глікозидів, що сприяють збереженню лабільних флавоноїдів та синергізму вітамінів С та Р (Balackaya, 2011).

Тому в подальшому формували композицію даних порошків листя смородини та гісопу в співвідношенні 1:1 та визначали оптимальну кількість внесення даної пряно-ароматичної композиції до ягідного соусу. Для цього до рецептури соусу з встановленою оптимальною кількістю

пюре ягід чорної смородини та пюре вишні (1,5:1), додаванням 20 % цукру, вносили 0,2-1,0 % порошку обраної пряно-ароматичної сировини.

Одним зі способів підбору та кількості внесення пряно-ароматичної сировини у соусну продукцію є органолептичний. Органолептичний аналіз соусу дає змогу швидко і просто оцінити якість. Адже якість продукції є головним завданням всіх галузей харчової промисловості.

Критеріями оцінювання органолептичних властивостей готового соусу було визначено: смак, запах, колір, зовнішній вигляд, консистенція.

Кожний із цих показників оцінювався експертами у балах: «відмінно» – 5 балів (дуже бажаний), «добре» – 4 бали (бажаний), «задовільно» – 3 бали (середньобажаний), «незадовільно» – 2 бали (мало-бажаний), 1 бал – дуже погано (небажаний).

Профілограма виготовлених зразків соусів з різною кількістю пряно-ароматичної сировини наведено на рис. 1.

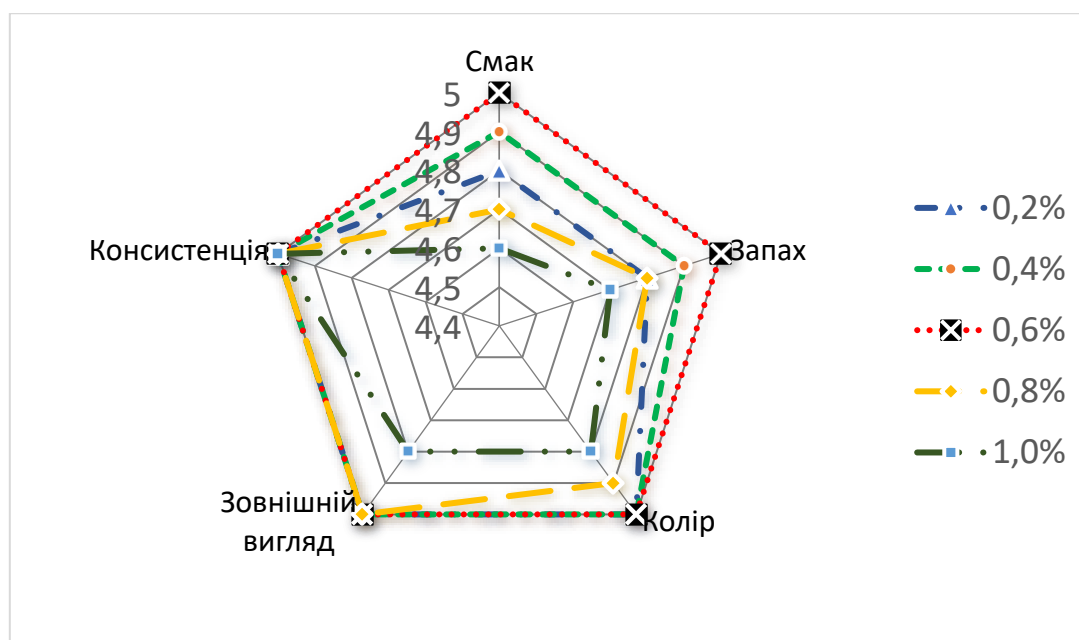


Рис. 1. Профілограма якості органолептичних показників досліджуваних зразків соусів з різним відсотком внесення пряно-ароматичної сировини

Як видно з профілограми, оптимальною дозою внесення обраної пряно-ароматичної сировини є 0,6 %. За даної кількості внесення прошку листя смородини та гісопу у співвідношенні 1:1 готовий соус кисло-солодкого смаку, із вираженим смаком чорної смородини та вишні з

легким букетом пряно-ароматичної композиції в післясмаці.

Результати по визначенню кінцевої якості готового соусу, у визначених оптимальних співвідношеннях рецептурних інгредієнтів наведено в табл. 6.

Таблиця 6

Органолептичні, фізико-хімічні показники та вміст основних БАР розробленого оздоровчого соусу

Соус смородиново-вишневий з додаванням пряно-ароматичної сировини	
Зовнішній вигляд	Однорідна, рівномірно протерта пюреподібна маса
Колір	Темно-бордовий
Консистенція	Однорідна, без сторонніх включень
Смак і запах	Кисло-солодкий, із вираженим смаком чорної смородини, вишень та легким післясмаком пряно-ароматичної сировини. Без сторонніх запахів
СР, %	25,2
Масова частка загальних (титрованих) кислот, %	1,46
Вміст пектинових речовин, %	0,99
Вміст поліфенольних сполук, мг/100 г	183
Вміст вітаміну С, мг/100 г	60
Вміст каротиноїдів, мг/100 г	3,1

Всі органолептичні і фізико-хімічні показники відповідають нормативним показникам для таких соусів згідно ДСТУ 6087:2009 Консерви. Соуси фруктові. Технічні умови.

За вимогами ДСТУ 6087:2009 показник масової частки сухих речовин повинен бути не менше ніж 19-23 %. Результати досліджень показали, що масова частка розчинних сухих речовин в розробленому соусі становить 25,2 %, що відповідає нормативним вимогам. Масова частка титрованих кислот склала 1,46 %, що впливає на смак та термін зберігання готового продукту. Адже органічні кислоти здатні посилювати і збагачувати смак продуктів, використовуються як консерванти (Stratford & Eklund, 2003). Зазвичай, чим вища кислотність продукту, тим менша ймовірність того, що він буде зіпсований мікроорганізмами (Lystopad, 2021).

Згідно з даними експерименту (табл. 6), 100 г розробленого соусу забезпечує достатньо високий рівень добової потреби людини у пектинових речовинах, вітамінах. Відповідно до Норм фізіологічних потреб населення України в основних харчових речовинах і енергії (2017р.) для розробленого соусу частка з забезпечення аскорбіновою кислотою становить 60 % (добова потреба 100 мг), β-каротином – 62 % (добова потреба 5 мг); пектином – 19,8 % (добова потреба 5 г), біофлавоноїдами – 73,2 % (рекомендоване споживання 250 мг).

#### **Фінансування / Funding**

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

#### **Етичне схвалення / Ethical approval**

Не застосовується / Not applicable.

#### **Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement**

Не застосовується / Not applicable.

#### **Доступ до даних / Access to data**

Автори нададуть вихідні дані дослідження на вимогу зацікавлених сторін / The authors will provide the research data at the request of stakeholders.

#### **Конфлікт інтересів / Conflict of interest**

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

#### **Висновки**

Аналіз сучасного ринку соусної продукції показав, що соуси з різноманітними рецептурними компонентами, текстурою та смаком користуються великим попитом. Водночас сучасний світ стикається з численними проблемами у сфері охорони здоров'я, які безпосередньо залежать від харчування. Зростання частки харчових продуктів оздоровчого призначення, у складі яких наявні або додатково введені фізіологічно функціональні інгредієнти, є актуальним завданням зміцнення здоров'я населення. Одним зі шляхів розв'язання цієї проблеми є застосування та комбінування різноманітної плодово-ягідної, пряно-ароматичної й лікарської сировини, яка є джерелом біологічно активних речовин.

У даній роботі досліджено та підтверджено доцільність використання ягідного міксу на основі чорної смородини й вишні та пряно-ароматичної добавки в технології отримання оздоровчого соусу. Обрана ягідна сировина і пряно-ароматична добавка у вигляді порошку з листя чорної смородини та гісопу лікарського містять значну кількість біофлавоноїдів, вітамінів, харчових волокон і є цінною сировиною для створення харчових продуктів оздоровчого та функціонального призначення. Встановлено, що розроблений соус належить до категорії функціональних продуктів. Адже інтегральний скор дефіцитних нутрієнтів дорівнює: вітамін С – 60 %; β-каротин – 62 %; пектинові речовини – 19,8 %, біофлавоноїди – 73,2 %.



## References

- Ahouagi, V. B., Mequelino, D. B., Tavano, O. L., Dias Garcia, J. A., Nachtigall, A. M., & Vilas Boas, B. M. (2021). Physicochemical characteristics, antioxidant activity, and acceptability of strawberry-enriched ketchup sauces. *Food Chemistry*, 340, 127925. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127925>
- Andreeva, S., & Kolesnikova, M. (2017). The study of thermodynamic properties of physical modification starches in the production of sauces sweet. *Food science and technology*, 11(2), 26–31. <http://dx.doi.org/10.15673/fst.v11i2.510> (in Ukrainian)  
Андрєєва С.С., Колеснікова М.Б. Дослідження термодинамічних властивостей крохмалів фізичної модифікації при виробництві соусів солодких. *Харчова наука та технологія*. 2017. №11(2). С. 26–31. DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/fst.v11i2.510>
- Azgaldov, G. G., & Kostin, A. V. (2011). Applied qualimetry: its origins, errors and misconceptions. *Benchmarking: An International Journal*, 18(3), 428–444. <https://doi.org/10.1108/14635771111137796>
- Balackaya, N. Y. (2011). Technology of sauces baccate with the use of natural untraditional raw material [Doctoral dissertation, Kharkiv]. PQDT Open. (in Ukrainian).  
Балацька Н. Ю. Технологія соусів ягідних з використанням природної нетрадиційної сировини: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.16 – технологія продуктів харчування. Харків, 2011. 19 с.
- Bashta, A., Ivchuk, N., Stetsenko, N., & Bashta, O. (2021). Rationale of fruit and berry raw materials choice to increase the confectionery nutritional value. *Ukrainian Journal of Food Science*, 9(1), 103–115. <https://doi.org/10.24263/2310-1008-2021-9-1-10>
- Battino, M., Beekwilder, J., Denoyes-Rothan, B., Laimer, M., McDougall, G.J., & Mezzetti, B. (2009). Bioactive compounds in berries relevant to human health. *Nutrition Reviews*, 67(1), 145–150. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2009.00178.x>
- Bhupinder Kaur, Fazilah Ariffin, Rajeev Bhat, & Alias A. Karim. (2012). Progress in starch modification in the last decade. *Food Hydrocolloids*, 26(2), 398–404. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.02.016>
- Bunea, A. (2008). Lutein Esters from *Tagetes erecta* L.: Isolation and enzymatic hydrolysis. *Bulletin UASVM Animal Science and Biotechnologies*, 65(1–2), 410–413. <https://doi.org/10.15835/buasvmcn-asb:65:1-2:1147>
- Chandel, V., Biswas, D., Roy, S., Vaidya, D., Verma, A., & Gupta, A. (2022). Current advancements in pectin: extraction, properties and multifunctional. *Applications Food*, 11(17), 2683. <https://doi.org/10.3390/foods11172683>
- Cho, H.M., Yoo, W., & Yoo, B. (2012). Steady and dynamic rheological properties of thickened beverages used for dysphagia diets. *The Food Science and Biotechnolog*, 21, 1775–1779. <https://doi.org/10.1007/s10068-012-0237-4>
- Deinychenko, G., Lystopad, T., & Kolisnychenko, T. (2019). Research of the safety indicators of berry sauces with seaweed's raw materials. *Food science and technology*, 13(2), 103–110. <https://doi.org/10.15673/fst.v13i2.1405>
- Deinychenko, G., Lystopad, T., Novik, A., Chernushenko, L., Farisieiev, A., Matsuk, Y., & Kolisnychenko, T. (2020). Determining the content of macronutrients in berry sauces using a method of IR-spectroscopy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies: Technology and Equipment of Food Production*, 5, 11(107), 32–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.213365>

Deinychenko, G. V., Lystopad, T. S., & Kolisnychenko, T. O. (2018). Rationale for using of algae raw materials in production of sauce from wild and cultivated berries. *Proceedings of Tavria State Agrotechnological University*, 18(1), 29–36. (in Ukrainian)

Дейниченко Г.В., Листопад Т.С., Колісниченко Т.О. Обґрунтування доцільності використання водоростевої сировини при виготовленні соусів із дикорослих та культивованих ягід. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2018. Вип. 18., Т 1. С. 29–36.

Dipjyoti, S., & Suwendu, Bh. (2010). Hydrocolloids as thickening and gelling agents in food: a critical review. *Journal of Food Science and Technology*, 47, 587–597. <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0162-6>

El Babili, F., El Babili, M., Souchard, J.P., & Chatelain, C. (2013). Culinary decoctions: spectrophotometric determination of various polyphenols coupled with their antioxidant activities. *Pharmaceutical Crops*, 4, 15–20. <https://doi.org/10.2174/2210290601304010015>

Golota, O., & Bashta, A. (2024, May 15). The use of non-traditional raw materials for obtaining and expanding the range of sauces for health purposes. *Proceedings of the All-Ukrainian Student Scientific and Practical Internet Conference Hotel and restaurant business and food technology: current trends, challenges, innovations*. Lviv, Ivan Franko National University of Lviv, 189–191. (in Ukrainian)

Голота О., Башта А. Використання нетрадиційної сировини для отримання та розширення асортименту соусів оздоровчого призначення. *Готельно-ресторанний бізнес та харчові технології: сучасні тенденції, виклики, інновації*: Всеукраїнська студентська науково-практична інтернет-конференція, 15 травня 2024 року, м. Львів. Львів : ЛНУ ім. Івана Франка. 2024. С. 189–191.

Gramza-Michałowska, A., Bueschke, M., Kulczyński, B., Gliszczynska-Świągło, A., Kmiecik, D., Bilska, A., Purłan, M., Wałęsa, L., Ostrowski, M., Filipczuk, M., & Jędrusek-Golińska, A. (2019). Phenolic compounds and multivariate analysis of antiradical properties of red fruits. *J. of Food Measurement and Characterization*, 13(3), 1739–1747. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00091-x>

Guemouni, S., Brahmi, F., Hamitri-Guerfi, F., Smail, L., Amirouche, F., Mokrani, A., Djebari, S., Mouhoubi, Kh., Ayouaz, S., Yous, F., Kernou, O.-N., Boulekbache-Makhlouf, L., & Madani, Kh. (2023). Development and characterization of sauces formulation based on tomato and garlic powders. *The North African Journal of Food and Nutrition Research*, 7(15), 99–107. <https://doi.org/10.51745/najfnr.7.15.99-107>

Khomych, G. P., Levchenko, Y. V., & Oliynyk, N. V. (2016). Development of sweet sauces technology using Jerusalem artichoke and henomeles. *Scientific works of ONAFT*, 2(80), 28–33. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v80i2.327> (in Ukrainian)

Хомич Г.П., Левченко Ю.В., Олійник Н.В. Розробка технології солодких соусів з використанням топінамбуру та хеномелесу. *Наукові праці ОНАХТ*. 2016. Вип.2, Том 80. С.28–33. DOI: <https://doi.org/10.15673/swonaft.v80i2.327>

Kondratenko, P. V., Shevchuk, L. M., & Levchuk, L. M. (2008). Methods of quality assessment of fruit and berry products. SPD Zhyteliev SI

Kotyuk, L. (2013). Biochemical composition of the introductory species *Hyssopus officinalis* L. depending on varietal characteristics. *Bulletin of Lviv University. Biological series*, (62), 302–308. (in Ukrainian)

Котюк Л. Біохімічний склад інтродуцента *Hyssopus officinalis* L. залежно від сортових особливостей. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2013. № 62. С. 302–308

Kurz, C., Münz, M., Schieber, A., & Carle, R. (2008). Determination of the fruit content of apricot and strawberry jams and spreads and apricot and peach fruit preparations by gravimetric quantification of hemicellulose. *Food Chemistry*, 109(2), 447–454. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.12.061>

Kuzmyk, U. G., Yushchenko, N. M., Pasichnyi, V. M., & Mukoliv, I. M. (2017). Determining the content of biological active substances in the developed compositions of spices. *Scientific works of NUFT*, 23(2), 90–93. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/27686> (in Ukrainian)

Кузьмик У. Г., Ющенко Н. М., Пасічний В. М., Миколів І. М. Визначення вмісту біологічно активних речовин в розроблених композиціях прянощів. *Наукові праці НУХТ*. 2017. 23(2). С. 90–93. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/27686>

- Liu, J., Willför, S., & Xu, Ch. (2015). A review of bioactive plant polysaccharides: Biological activities, functionalization, and biomedical applications. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 5(1), 31–61. <https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2014.12.001>
- Lystopad, T. S. (2021). Development of technology of sauces from wild and cultivated berries with iodine-containing additives. [Doctoral dissertation, DBTU]. PQDT Open. (in Ukrainian)  
Листопад Т. С. Розробка технології соусів з дикорослих та культивованих ягід з йодвміщуючими добавками: дис. ... д-ра філософії: 181 – Харчові технології. Харків: ДБТУ, 2021. 310 с.
- Malyugina, E. A., Mazulin, A. V., Mazulin, G. V., Smoylovskaya, G. P., Logvin, P. A. (2013). The study of the carotenoid content in the inflorescences of the spreading marigold. *Current issues in pharmacy and medicine: science and practice*, (3), 89–91. <http://dSPACE.zsmu.edu.ua/handle/123456789/1531>  
Малюгіна О. О., Мазулін О. В., Мазулін Г. В., Смойловська Г. П., Логвін П. А. Визначення вмісту каротиноїдів у суцвіттях чорнобривців розлогих. *Актуал. питання фармац. та мед. науки та практики*. 2013. № 3. С. 89-91. <http://dSPACE.zsmu.edu.ua/handle/123456789/1531>
- Mandala, I. G., Savvas, T. P., & Kostaropoulos, A. E. (2004). Xanthan and locust bean gum influence on the rheology and structure of a white model–sauce. *Journal of Food Engineering*, 64(3), 335–342. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.10.018>
- Saura-Calixto, F., Serrano, J., & Goni, I. (2007). Intake and bioaccessibility of total polyphenols in a whole diet. *Food Chem*, 101, 492–501. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.02.006>
- Scalbert, A., Manach, C., Morand, C., & Remesy, C. (2005). Dietary polyphenols and the prevention of diseases. *Crit. Rev. Food Sci. Nutrition*, 45, 1–20. <https://doi.org/10.1080/1040869059096>
- Simakhina, G., Naumenko, N., & Kaminska, S. (2024). Changes in vitamin content and sensory characteristics of frozen wild berries during storage. *Ukrainian Food Journal*, 13(1), 60–75. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2024-13-1-5>
- Stepankova, G. V., Oliynyk, S. G., & Shydakova-Kamieniuka, O. G. (2019). Qualimetric assessment of wheat bread quality using oat germ meal and corn germ cake. *Scientific works of NUFT*, 25(1), 233–242. <https://dSPACE.nuft.edu.ua/handle/123456789/28866> (in Ukrainian).  
Степанькова Г. В., Олійник С. Г., Шидакова-Каменюка О. Г. Кваліметрична оцінка якості хліба пшеничного з використанням шроту зародків вівса та макухи зародків кукурудзи. *Наукові праці НУХТ*. 2019. №25(1). С. 233–242. <https://dSPACE.nuft.edu.ua/handle/123456789/28866>
- Stratford, M., & Eklund, T. (2003). Organic acids and esters. In: Russell, N.J., Gould, G.W. (eds) *Food Preservatives*. Springer. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-30042-9\\_4](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-30042-9_4)
- Vishnikin, A., Melnikov, K., Kolisnychenko, T., Lystopad, T., & Pidhoma, D. (2019). Development of berry drinks with a high content of ascorbic acid. *Food Science and Technology*, 13(3). <http://dx.doi.org/10.15673/fst.v13i3.1454>
- Wu, Q., & Melnyk, O. (2022). Improving the technology of sauces using vegetable and berry raw materials. *Bulletin of Sumy National Agrarian University*, 4(50), 3–7. <https://doi.org/10.32782/msnau.2022.4.1>
- Zhukevych, O., & Rudavska, H. (2012). Production and consumption of sauces in Ukraine. *Goods and markets*, (1), 37–45. (in Ukrainian)  
Жукевич О., Рудаєвська Г. Виробництво та споживання соусів в Україні. *Товари і ринки*. 2012. №1. С. 37–45

Received: 21.02.2025. Accepted: 11.03.2025. Published: 03.04.2025.

**Ви можете цитувати цю статтю так:**

Башта А., Стеценко Н., Бажай-Жежерун С. Підвищення харчової цінності та розширення асортименту соусів оздоровчого призначення. *Biota. Human. Technology*. 2025. №1. С. 161-175.

**Cite this article in APA style as:**

Bashta, A., Stetsenko, N., & Bazhay-Zhezherun, S. (2025). Increasing the nutritional value and expanding the range of sauces for health. *Biota. Human. Technology*, 1, P. 161-175. (in Ukrainian)

**Information about the authors:**

**Bashta A.** [*in Ukrainian: Башта А.*] <sup>1</sup>, Ph.D. in Tech. Sc., Assoc. Prof., email: alla.sher.b@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0310-3788

Department of Technology of Healthy Food, National University of Food Technologies

68 Volodymyrska Street, Kyiv, 01601, Ukraine

**Stetsenko N.** [*in Ukrainian: Стеценко Н.*] <sup>2</sup>, Ph.D. in Chem. Sc., Assoc. Prof., email: stetsenkono\_nuft@ukr.net

ORCID: 0000-0001-6710-024X

ResearcherID: JGD-0053-2023

Scopus-AuthorID: 8287193200

Department of Technology of Healthy Food, National University of Food Technologies

68 Volodymyrska Street, Kyiv, 01601, Ukraine

**Bazhay-Zhezherun S.** [*in Ukrainian: Бажай-Жежерун С.*] <sup>3</sup>, Ph.D. in Tech. Sc., Assoc. Prof., email: lananew\_1@ukr.net

ORCID: 0000-0002-5382-4842

Department of Technology of Healthy Food, National University of Food Technologies

68 Volodymyrska Street, Kyiv, 01601, Ukraine

---

<sup>1</sup> Study design, data collection, statistical analysis, manuscript preparation.

<sup>2</sup> Study design, data collection.

<sup>3</sup> Data collection, manuscript preparation.



# **CHEMICAL TECHNOLOGIES**

## **ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ**







Copyright (c) 2025 Olena Bondar, Inna Tarasenko, Iryna Kurmakova, Olexandr Makei

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

**Олена Бондар, Інна Тарасенко, Ірина Курмакова, Олександр Макей**  
**КВАНТОВО-ХІМІЧНІ ДЕСКРИПТОРИ ТА БІОЛОГІЧНА АКТИВНІСТЬ**  
**2-АМІНО-4-АРИЛ-1,3-ОКСАЗОЛІВ**



**Olena Bondar, Inna Tarasenko, Iryna Kurmakova, Olexandr Makei**  
**QUANTUM CHEMICAL DESCRIPTORS AND BIOLOGICAL ACTIVITY**  
**OF 2-AMINO-4-ARYL-1,3-OXAZOLES**

### АНОТАЦІЯ

**Мета статті.** Розрахунок квантово-хімічних дескрипторів похідних 2-аміно-4-арил-1,3-оксазолу, прогнозування ймовірних білків-мішеней, та встановлення кореляційних залежностей типу «біологічна активність – квантово-хімічний дескриптор».

**Методологія.** Дослідження проведено з використанням пакетів програмного забезпечення ChemOffice (PerkinElmer Informatics Inc., 2018), ACDLabs (Advanced Chemistry Development Inc.), онлайн ресурсів Molinspiration Cheminformatics (Slovensky Grob, Slovakia <https://molinspiration.com/cgi/properties>), OSIRIS Property Explorer (Idorsia Pharmaceuticals Ltd, Switzerland Molecular Properties Prediction, <https://www.organic-chemistry.org/prog/peo/>), SwissTargetPrediction ((SIB Swiss Institute of Bioinformatics, <http://www.swisstargetprediction.ch/>), SuperPred (Structural Bioinformatics Group, Institute of Physiology Charité-University Medicine, Berlin, [https://prediction.charite.de/subpages/target\\_prediction.php](https://prediction.charite.de/subpages/target_prediction.php)), ProTox (Structural Bioinformatics Group, Institute of Physiology Charité-University Medicine, Berlin <https://tox.charite.de/prottox3>). Для проведення кореляційного та регресійного аналізів в координатах вірогідність зв'язування – квантово-хімічні дескриптори використано програму Microsoft Excel.

**Наукова новизна.** Проведено прогнозування фармакологічної активності нових похідних 2-аміно-4-арил-1,3-оксазолу та виявлені кореляційні залежності між ймовірністю її прояву та квантово-хімічними параметрами молекул.

**Висновки.** Встановлено ряд кореляційних залежностей для ймовірних лігандів з найбільшою вірогідністю зв'язування та такими квантово-хімічними дескрипторами як заряди на атомах оксигену і нітрогену, енергії вищої зайнятої та нижньої вакантної молекулярних орбіталей. Отримані результати є корисними для більш обґрунтованого прогнозування біологічної активності нових похідних 2-аміно-4-арил-1,3-оксазолів та синтезу перспективних лікарських форм.

**Ключові слова:** 2-аміно-4-арил-1,3-оксазоли, квантово-хімічні дескриптори, фармакологічна активність, кореляційна залежність

### ABSTRACT

**Purpose of the work.** To calculate quantum chemical descriptors for 2-amino-4-aryl-1,3-oxazole derivatives, prediction of possible protein targets, and establishment of correlational dependencies of the type "biological activity - quantum-chemical descriptor".

**Methodology.** The study was conducted using ChemOffice software packages (PerkinElmer Informatics Inc, 2018), ACDLabs (Advanced Chemistry Development Inc.), online resources Molinspiration Cheminformatics (Slovensky Grob, Slovakia <https://molinspiration.com/cgi/properties>), OSIRIS Property Explorer (Idorsia Pharmaceuticals Ltd, Switzerland Molecular Properties Prediction, <https://www.organic-chemistry.org/prog/peo/>), SwissTargetPrediction (SIB Swiss Institute of Bioinformatics, <http://www.swisstargetprediction.ch/>), SuperPred (Structural Bioinformatics Group, Institute of Physiology Charité-University Medicine, Berlin, [https://prediction.charite.de/subpages/target\\_prediction.php](https://prediction.charite.de/subpages/target_prediction.php)), ProTox (Structural Bioinformatics Group, Institute of Physiology Charité-University Medicine,

Berlin <https://tox.charite.de/protox3>). Microsoft Excel was used to perform correlation and regression analyses in the coordinates of binding probability - quantum chemical descriptors.

**Scientific novelty.** Were evaluated the pharmacological activity of new 2-amino-4-aryl-1,3-oxazole derivatives and identified correlations between the probability of their effectiveness and the quantum chemical parameters of the molecules.

**Conclusions.** Several correlations have been established for the probable ligands, focusing on those with the highest binding probability as well as various quantum chemical descriptors, including the charges on oxygen and nitrogen atoms and the energies of the highest occupied and lowest vacant molecular orbitals. The results obtained are valuable for making more informed predictions about the biological activity of new 2-amino-4-aryl-1,3-oxazole derivatives and for guiding the synthesis of promising dosage forms.

**Key words:** 2-amino-4-aryl-1,3-oxazoles, quantum-chemical descriptors, pharmacological activity, correlation dependence

## Постановка проблеми

### Актуальність роботи

Важливе місце серед сучасного асортименту лікарських засобів займають препарати на основі нітрогеновмісних гетероциклічних сполук. Останнім часом зростає інтерес до сполук з оксазольним циклом, зокрема, проводяться дослідження, які демонструють їх перспективність для пошуку нових лікарських форм та створення препаратів з кращими терапевтичними властивостями та меншою кількістю проявів побічної дії.

Сучасним підходом до розробки лікарських засобів є обґрунтований пошук та цілеспрямований синтез сполук з певною фармакологічною дією. Важливим етапом такого підходу є комп'ютерне моделювання для прогнозування фармакологічної активності, яке передбачає визначення механізму взаємодії потенційних лікарських засобів з білками-рецепторами. Для пояснення та прогнозування біологічної активності сполук використовують квантово-хімічні дескриптори такі, як розподіл зарядів на атомах, енергія вищої зайнятої молекулярної орбіталі, енергія нижньої вакантної молекулярної орбіталі, показник ліпофільності, загально енергетичні параметри та топологічні показники (Чекман, 2010).

При цьому актуальним є не лише прогнозування певного виду фармакологічної активності, а й виявлення кореляційних залежностей між ймовірністю її прояву та квантово-хімічними параметрами молекул.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

В останні роки зростає інтерес дослідників до пошуку біологічно-активних речовин серед похідних 1,3-оксазолу. Так, авторами (Li et al, 2014) описано 3-меркапто-2-метил-

N-(4-метил-1,3-оксазол-2-іл)-пропанамід як потужний інгібітор Нью-Делі метало- $\beta$ -лактамази-1, який може викликати стійкість бактерій до широкого спектру  $\beta$ -лактамних антибіотиків. Подальші дослідження показали, що тіольна та амідна група, які входять до складу молекули, можуть бути важливими для зв'язування з активним центром білка NDM-1, а атом сульфуру та карбонільний атом кисню можуть хелатувати з іоном цинку в активному центрі NDM-1. Похідним 1,3-оксазолу з протигрибковими властивостями виявився 2-(1*H*-індол-3-іл)-1,3-оксазол, який показує високу активність проти *Alternaria brassicicola* у концентрації 0,50 мМ (Pedras & Abdoli, 2023).

Кореляційні залежності між квантово-хімічними дескрипторами та біологічною активністю сполук виявлені та описані для похідних фенілетиленаміну (Lukovits et al., 1976), циклічних та нециклічних алканів (Alias et al., 2021), 1,2,4-триазоло[1,5-*a*]піримідину (Bondar et al., 2022), похідних 5,8-хінолін хінону (Gulseven Sidir & Sidir, 2023).

Отже, для похідних 1,3-оксазолу існує висока ймовірність встановлення кореляції між квантово-хімічними дескрипторами (енергія вищої зайнятої молекулярної орбіталі (E<sub>НОМО</sub>), енергія нижньої вакантної молекулярної орбіталі (E<sub>ЛУМО</sub>), розподіл зарядів на атомах, ліпофільність) та ймовірною біологічною активністю. Це дозволить прогнозувати їх фармакологічний потенціал та проводити цілеспрямований синтез.

Метою роботи був розрахунок квантово-хімічних дескрипторів похідних 2-аміно-4-арил-1,3-оксазолу, прогнозування білків-мішеней, з якими можливо їх зв'язування в якості лігандів, та встановлення кореляційних залежностей типу «біологічна активність – квантово-хімічний дескриптор».

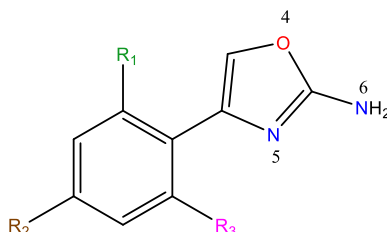
## Методологія

Досліджено квантово-хімічні та фармакокінетичні характеристики ряду похідних 2-аміно-4-арил-1,3-оксазолу з галоген-замісниками у бензеновому ядрі (табл. 1), як

перспективних біологічно активних сполук. Їх синтез, здійснений при взаємодії відповідних кетоспиртів з ціанамідом, та дані ПМР-спектроскопії, які підтверджують будову молекул, представлено в роботі (Tretiak & Makei, 2023).

Таблиця 1

### Досліджені похідні 2-аміно-4-арил-1,3-оксазолу



№	R1	R2	R3	Назва за IUPAC
1	-H	-H	-H	4-феніл-1,3-оксазол-2-амін
2	-H	-Cl	-H	4-(4-хлорофеніл)оксазол-2-амін
3	-H	-Br	-H	4-(4-бромфеніл)оксазол-2-амін
4	-H	-F	-H	4-(4-флуорофеніл)оксазол-2-амін
5	-H	-H	-Cl	4-(2-хлорофеніл)оксазол-2-амін
6	-F	-H	-F	4-(2,6-дифлуорофеніл)оксазол-2-амін

Розрахунки квантово-хімічних дескрипторів молекул проведено за допомогою пакетів програмного забезпечення ChemOffice (PerkinElmer Informatics Inc., 2018), ACDLabs (Advanced Chemistry Development Inc.), онлайн ресурсів Molinspiration Cheminformatics (Slovensky Grob, Slovakia <https://molinspiration.com/cgi/properties>), OSIRIS Property Explorer (Idorsia Pharmaceuticals Ltd, Switzerland Molecular Properties Prediction, <https://www.organic-chemistry.org/prog/peo/>), SwissTargetPrediction ((SIB Swiss Institute of Bioinformatics, <http://www.swisstargetprediction.ch/>), SuperPred (Structural Bioinformatics Group, Institute of Physiology Charité-University Medicine, Berlin, [https://prediction.charite.de/subpages/target\\_prediction.php](https://prediction.charite.de/subpages/target_prediction.php)), ProTox (Structural Bioinformatics Group, Institute of Physiology Charité-University Medicine, Berlin <https://tox.charite.de/protox3>).

За допомогою програми Chem3D (пакет програм ChemOffice), розраховували розподіл електронних зарядів на атомах молекул та енергетичні характеристики. Перед проведенням розрахунків здійснювалась оптимізація геометрії молекули за методом

MM2 (minimum RMS gradient = 0.010, step interval = 2, frame interval = 10, target temperature = 300 K; parameter quality: all parameters used are finalized; job type: minimize energy to minimum RMS gradient of 0.010 display every iteration). Розрахунок енергій вищої зайнятої молекулярної орбіталь (Highest Occupied Molecular Orbital, HOMO) та нижньої вакантної молекулярної орбіталь (Lowest Unoccupied Molecular Orbital LUMO), здійснювався за розширеним методом Хюккеля. Величину «енергетичної щільності» ( $\Delta E$ ) розраховували за формулою (1):

$$\Delta E = E_{\text{HOMO}} - E_{\text{LUMO}}, \quad (1)$$

де  $E_{\text{HOMO}}$  – енергія вищої зайнятої молекулярної орбіталь (eV).

$E_{\text{LUMO}}$  – енергія нижньої вакантної молекулярної орбіталь (eV).

Оцінка відповідності правилу Ліпінського здійснювалась шляхом розрахунку відповідних складових (розраховано молекулярну масу сполук (MW), кількість акцепторів водневого зв'язку (nON), кількість донорів водневого зв'язку (nOHNH), кількість нетермінальних зв'язків, що обертаються

(nrotb) та показник ліофільності (LogP) за допомогою онлайн-ресурсу Molinspiration Cheminformatics.

Прогнозування гострої токсичності (LD<sub>50</sub>) здійснено за допомогою онлайн-ресурсу ProTox (<https://tox.charite.de/protox3>).

За допомогою програми OSIRIS Property Explorer розраховували:

– топологічну площу полярної поверхні (TPSA) – показник, що визначається як сума поверхні всіх полярних атомів, перш за все кисню і нітрогену включаючи зв'язані з ними атоми гідрогену (Prasanna & Doerksen, 2009). Він дозволяє оцінити пероральну біодоступність та здатність речовини проникати через клітинні мембрани та гематоенцефалічний бар'єр (Sánchez-Martínez, 2022).

– Druglikness – показник, що характеризує подібність до вже відомих фармакологічних препаратів.

– Drugscore – величина, що об'єднує druglikeness, cLogP, logS, молекулярну масу та ризики прояву токсичності (Veles et al., 2005) та показує загальний потенціал структури бути потенційним лікарським препаратом.

Оцінка фармакокінетичних параметрів проводилась за допомогою програми SwissTargetPrediction. Оцінювалась здатність речовин до всмоктування у шлунково-кишковому тракту – Gastrointestinal absorption (GI absorption), здатність проникати через гематоенцефалічний бар'єр – Blood-brain barrier permeant (BBB permeant), можливість зв'язування з Р-глікопротеїд субстратом (P-gp substrate), інгібувати такі форми

ізохрому P450 як CYP1A2, CYP2C19, CYP2C9, CYP2D6, CYP3A4.

За допомогою онлайн-ресурсу SuperPred оцінювали ймовірність зв'язування сполук з білковими мішенями. Цей ресурс дозволяє порівнювати структуру вхідної молекули з базою даних відомих препаратів, пов'язаних з ними мішенями та шляхами впливу, що є корисним для пошуку нових ефективних препаратів (Gallo et al., 2022).

Для пошуку кореляційних залежностей між ймовірністю зв'язування з білком та квантово-хімічними параметрами молекул проводили регресійний та кореляційний аналіз. За допомогою програми Microsoft Excel здійснювали лінійний регресійний аналіз та розраховували коефіцієнт кореляції Пірсона.

### Результати дослідження

Розрахунок квантово-хімічних параметрів є важливою складовою прогнозування фармакологічної активності речовин. Одними з важливих параметрів є величина енергій вищої зайнятої та нижньої вакантної молекулярних орбіталей та розподіл зарядів на атомах молекули (табл 2). За значенням енергії нижньої вакантної молекулярної орбіталі ( $E_{LUMO} > 0$ ) можна зробити висновок, що електрофільні властивості проявляють сполука 1 з незаміщеним фенільним фрагментом та сполука 5, що містить хлорзамісник у 2 положенні бензенового кільця. Такі сполуки можуть зв'язуватися з негативно зарядженими центрами.

Таблиця 2

### Енергетичні характеристики похідних 2-аміно-4-арил-1,3-оксазолів

Показник	Значення енергетичного показника для відповідної сполуки					
	1	2	3	4	5	6
$E_{HOMO}$ , eV	-8,119	-7,905	-7,932	-7,947	-7,742	-7,848
$E_{LUMO}$ , eV	-0,669	0,214	0,014	0,328	-0,591	0,100
$\Delta E$	8,788	7,691	7,918	7,619	7,151	7,748

Сполуки 2, 3, 4, 6 є слабкими нуклеофілами. Важливим показником реакційної здатності є значення «енергетичної щільності», яка являє собою різницю енергій вищої зайнятої та нижньої вакантної молекулярних орбіталей. Згідно (Aihara, 1999) висока реакційна здатність

проявляється при значенні зазначеного показника  $> 1$ .

Розрахунок зарядів на атомах 2-аміно-4-арил-1,3-оксазолів (табл. 3) показав, що можливими адсорбційно-реакційними центрами молекул можуть бути атоми кисню та нітрогену оксазольного

циклу, атом нітрогену аміногрупи, атоми галогенів. Для всіх молекул атом нітрогену оксазольного циклу має майже однаковий достатньо високий негативний заряд, тож може виступати електронно-донорним центром. У той же час атоми нітрогену аміногрупи мають невисокий позитивний заряд, як і атоми кисню. При цьому заряд

на атомі кисню зменшується при введенні в бензольний цикл замісників. Атоми N(6) та O(4) можуть бути електронно-акцепторними центрами. Закономірна зміна зарядів дозволяє прогнозувати вплив на певні властивості і, відповідно, наявність можливої кореляції між її проявом та величиною зарядів на зазначених атомах.

Таблиця 3

Розподіл зарядів на атомах 2-аміно-4-арил-1,3-оксазолів

Атом	Величина заряду для відповідної сполуки					
	1	2	3	4	5	6
O <sup>4</sup>	0,0405	0,0259	0,0287	0,0255	0,0337	0,0177
N <sup>5</sup>	-0,5985	-0,5976	-0,5978	-0,5971	-0,5914	-0,5968
N <sup>6</sup>	0,0238	0,0227	0,0229	0,0225	0,0211	0,0214
Cl	-	0,0335	-	-	0,0036	-
F	-	-	-	-0,1372	-	-0,1383* -0,1340**
Br	-	-	0,0372	-	-	-

**Примітка:** «←» - атом відсутній; \*заряд на атомі флуору у 2 положенні бензольного фрагменту, \*\*заряд на атомі флуору у 6 положенні бензольного фрагменту.

Аналіз розподілу електронного потенціалу показав, що зонами підвищеної електронної густини є атоми нітрогену та кисню оксазольного циклу, а також атоми хлору та флуору (сполуки 2 та 4), що підтверджують схеми розподілу електростатичного потенціалу (рис. 1).

Саме ці атоми мають здатність утворювати полярні ковалентні зв'язки, що робить молекули більш реакційно здатними (Politzer et al., 2016) та, ймовірно, беруть участь у формуванні зв'язків при білок-лігандній взаємодії, тим самим забезпечуючи фармакологічну активність.

Для оцінки лікоподібності сполук здійснюють аналіз відповідності структури параметрам, які входять до «правила п'яти» або правила Ліпінського (Lipinski et al., 2001), яке регламентує значення: молекулярної маси (MW); коефіцієнту розподілу у системі 1-октанол/вода (LogP); кількості нетермінальних зв'язків, що обертаються (rotb); кількості донорів водневого зв'язку (nON) та кількості акцепторів водневого зв'язку (nOHNH). Аналіз структур 2-аміно-4-арил-1,3-оксазолу за допомогою сервісу Molinspiration Cheminformatics показав, що для проаналізованих

структур відхилень не спостерігається (табл. 4). Значення показника ліпофільності (LogP) всіх молекул, в межах від 1 до 5 також вказує на високу здатність до проникнення крізь клітинні мембрани. Це також підтверджується розрахунком топологічної площі полярної поверхні (52,05 Å<sup>2</sup> для всіх молекул), що є одним з визначальних факторів біодоступності речовин (Muegge I., 2003).

За даними онлайн-прогнозу токсичності сполук (онлайн-ресурс Pro-Tox) всі речовини відносяться до 4 класу небезпеки, мають низький ризик прояву гепатотоксичності, що відповідає вимогам для потенційних фармакологічних препаратів.

Позитивне значення Druglikeness (табл. 5) для сполук 1, 2 та 5 вказує, що вони містять переважно фрагменти, які є в структурі відомих лікарських засобів. За значеннями комплексного показника DrugScore можна зробити висновок, що найбільший потенціал для того щоб бути потенційним лікарським препаратом має сполука 2 з замісником -Cl у пара положенні.



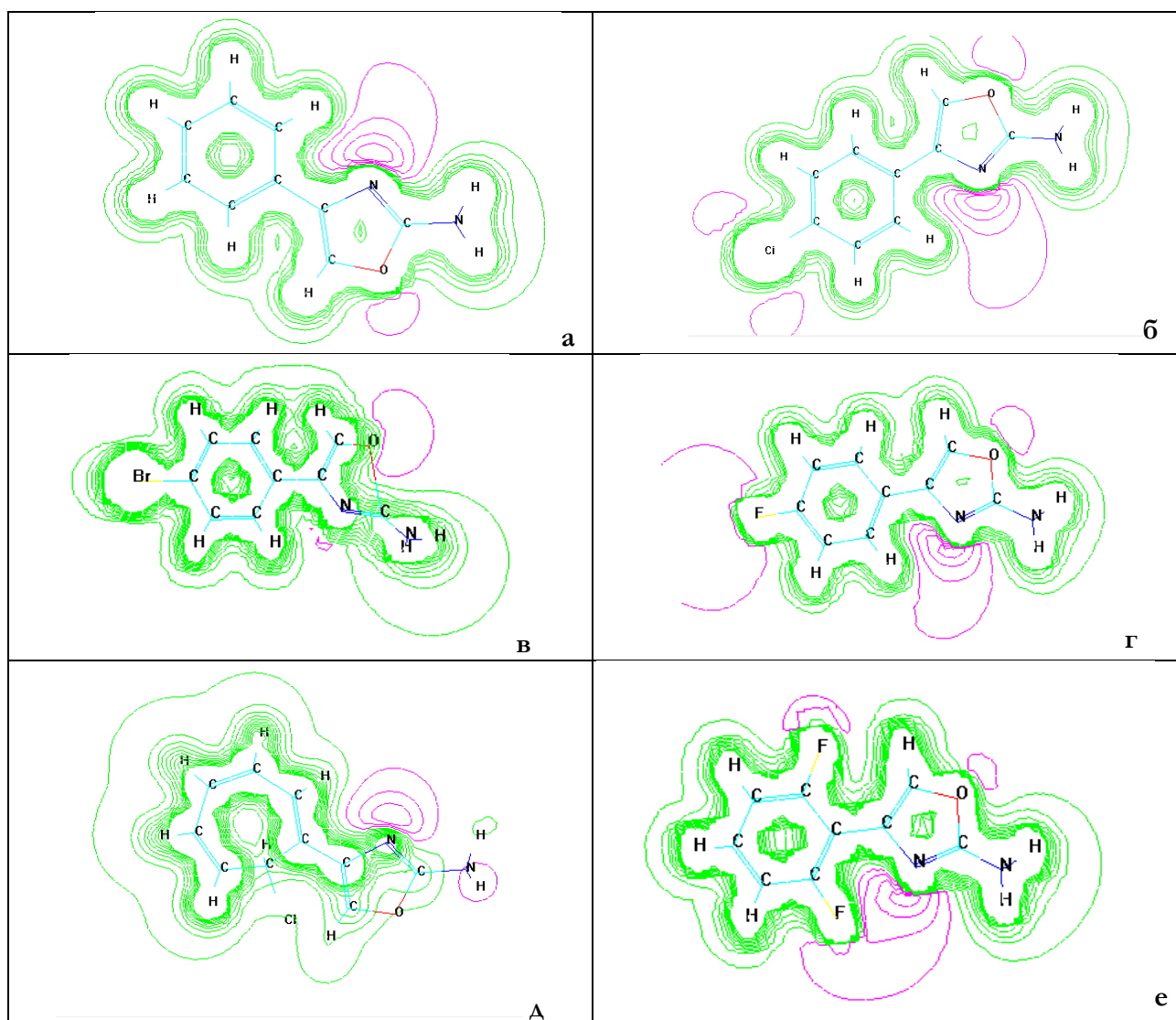


Рис. 1. Розподіл електростатичного потенціалу на 2-аміно-4-арил-1,3-оксазолів:  
а) сполука 1; б) сполука 2; в) сполука 3; г) сполука 4; д) сполука 5; е) сполука 6

Таблиця 4

## Відповідність сполук вимогам правила Ліпінського

Показник	Згідно з правилом	Значення показника для відповідної сполуки					
		1	2	3	4	5	6
LogP	< 5	1,51	2,18	2,31	1,74	2,14	1,67
MW	< 500	160	194,5	239	196	194,5	178
nON	< 5	3	3	3	3	3	3
nOHNH	< 10	2	2	2	2	2	2
nrotb	< 10	1	1	1	1	1	1

Таблиця 5

## Показники Druglikeness та DrugScore 2-аміно-4-арил-1,3-оксазолів

Показник	Значення показника для відповідної сполуки					
	1	2	3	4	5	6
Druglikeness	0,13	1,07	-2,0	0,55	-3,03	-0,75
DrugScore	0,69	0,73	0,46	0,68	0,45	0,58

На наступному етапі дослідження було проведено аналіз фармакокінетичних параметрів молекул (табл. 6.), зокрема таких як здатність до гастроентеральної адсорбції (GI absorption), можливість зв'язування з Р-глікопротеїд субстратом

(P-gp substrate), здатність проникати крізь гематоенцефалічний бар'єр (BBB permeant) та інгібувати різні ізоформи цитохрому P450 (CYP1A2, CYP2C19, CYP2C9, CYP2D6, CYP3A4).

Таблиця 6

#### Фармако-кінетичні параметри 2-аміно-4-арил-1,3-оксазолів

Показник	Значення фармако-кінетичного параметру для відповідної сполуки					
	1	2	3	4	5	6
GI absorption	High	High	High	High	High	High
BBB permeant	+	+	+	+	+	+
P-gp substrate	-	-	-	-	-	-
CYP1A2 inhibitor	+	+	+	+	+	+
CYP2C19 inhibitor	-	-	+	-	-	-
CYP3A4 inhibitor	-	-	-	-	-	-
CYP2D6 inhibitor	-	-	-	-	-	-
CYP2C9 inhibitor	-	-	-	-	-	-

**Примітка:** «High» – висока здатність до гастроентеральної адсорбції; «+» – сполука здатна проникати крізь гематоенцефалічний бар'єр або інгібувати певні форми цитохрому P450; «-» – сполука нездатна проникати крізь гематоенцефалічний бар'єр або інгібувати певні форми цитохрому P450.

Всі досліджені похідні оксазолу здатні проникати через гемато-енцефалічний бар'єр та характеризуються високою здатністю до адсорбції в шлунково-кишковому тракті. Важливим показником потенційного фармакологічного препарату, що впливає на взаємодію з іншими лікарськими засобами є інгібування ензимів цитохрому P450 (Pentyuk et al., 2004). Встановлено, що для всіх сполук ймовірно зв'язування з ізоформою цитохрому P450 CYP1A2, яка бере участь у метаболізмі таких речовин як кофеїн, теофілін, такрін, клозапін (Raunio et al, 2016). Сполука 3 також здатна зв'язуватися з ізоформою цитохрому P450 CYP2C19.

Важливим етапом пошуку нових ефективних лікарських засобів є прогнозування ймовірних білків-мішеней, для яких досліджені похідні оксазолу можуть виступати лігандами. За допомогою онлайн-ресурсу Super-Pred для кожної з сполук отримано понад 100 ймовірних білків-мішеней з різною вірогідністю зв'язування (ВЗ) у вигляді лігандів. Найбільшу ймовірність зв'язування виявлено для білків Cyclooxygenase-1, Kruppel-like factor 5, Calpain 1 Nuclear receptor ROR-beta, Quinone reductase 2, Adenosine A1 receptor, Dual

specificity protein phosphatase 3, Transcription intermediary factor 1-alpha.

Для встановлення кореляційних залежностей було обрано групу сполук 1-4 (незаміщена та з атомами галогенів у *n*-положенні бензольного ядра) та 20 білків мішеней з найвищими ймовірностями прояву. Аналіз залежностей (табл. 7) показав, що біологічні властивості корелюють з такими квантово-хімічними характеристиками як енергія вищої зайнятої молекулярної орбіталі та енергія нижньої вакантної молекулярної орбіталі, заряди на атомах нітрогену та кисню. Серед усіх проаналізованих залежностей встановлено високу кореляцію лише для ймовірностей зв'язування з білками Nuclear receptor ROR-beta, Dual specificity protein phosphatase 3, Transcription intermediary factor 1-alpha, Lysosomal Pro-X carboxypeptidase, Casein kinase II alpha/beta, Glycogen synthase kinase-3 beta, Thyroid hormone receptor alpha. Звертає увагу, що для ймовірності зв'язування з білком Lysosomal Pro-X carboxypeptidase виявлено високу кореляцію з декількома показниками: енергією нижньої вакантної молекулярної орбіталі та зарядами на атомах кисню та атомі нітрогену аміногрупи. Також декілька залежностей з високою кореляцією вияв-

лено для ймовірності зв'язування з Thyroid hormone receptor alpha.

З величиною енергії вищої зайнятої молекулярної орбіталі корелюють вірогідності зв'язування 2-аміно-4-арил-1,3-оксазолів з білками мішенями Nuclear receptor ROR-beta та Dual specificity protein phosphatase 3. Для значення заряду на атомі кисню встановлено високу кореляцію з ймовірністю утворювати білок-лігандні комплекси

з Transcription intermediary factor 1-alpha, Lysosomal Pro-X carboxypeptidase та Casein kinase II alpha/beta та Thyroid hormone receptor alpha. Для заряду на атомі нітрогену аміногрупи виявлено декілька кореляційних залежностей з високою кореляцією, в той же час для атому нітрогену оксазольного циклу – лише з ймовірністю зв'язування з Thyroid hormone receptor alpha.

Таблиця 7

Результати регресійного та кореляційного аналізу в координатах вірогідність зв'язування з білками – квантово-хімічні дескриптори

Білок – мішень	Рівняння регресії	r
1	2	3
Nuclear receptor ROR-beta	$B3 = -0,5233E_{НОМО} - 3,3968$	0,9842
Dual specificity protein phosphatase 3	$B3 = 0,5464 E_{НОМО} + 5,2698$	0,9842
Transcription intermediary factor 1-alpha	$B3 = -0,1755 E_{ЛУМО} + 0,7131$	0,9368
Transcription intermediary factor 1-alpha	$B3 = 138,99 q(0) - 2,4755$	0,9319
Lysosomal Pro-X carboxypeptidase	$B3 = 0,1391 E_{ЛУМО} + 0,8751$	0,9646
Lysosomal Pro-X carboxypeptidase	$B3 = -8,8312 q(0) + 1,1372$	0,9662
Lysosomal Pro-X carboxypeptidase	$B3 = 55,61 q(N^6) - 0,5614$	0,9993
Casein kinase II alpha/beta	$B3 = 4,5347 q(0) + 0,5786$	0,9979
Thyroid hormone receptor alpha	$B3 = 0,0565 q(0) + 0,7955$	0,9871
Thyroid hormone receptor alpha	$B3 = 0,0565 E_{ЛУМО} + 0,7955$	0,9871
Thyroid hormone receptor alpha	$B3 = -45,095 q(N^6) + 1,83$	0,9898
Thyroid hormone receptor alpha	$B3 = 44,207 q(N^5) + 27,22$	0,9750

### Висновки

Встановлено ряд кореляційних залежностей для ймовірних лігандів з найбільшою вірогідністю зв'язування та такими квантово-хімічними дескрипторами як заряди на атомах кисню і нітрогену,

енергії вищої зайнятої та нижньої вакантної молекулярних орбіталей. Отримані результати є корисними для більш обґрунтованого прогнозування біологічної активності нових похідних 2-аміно-4-арил-1,3-оксазолів та синтезу перспективних лікарських форм.

### 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 / Conflicts of Interest

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

## References

- Aihara, J. (1999). Reduced HOMO-LUMO Gap as an Index of Kinetic Stability for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *The Journal of Physical Chemistry A*, 103, 7487-7495. <https://doi.org/10.1021/jp990092i>
- Alias, A., Zabidi, Z., Zakaria, N., Mahmud, Z., & Ali, R. (2021). Biological Activity Relationship of Cyclic and Noncyclic Alkanes Using Quantum Molecular Descriptors. *Open Journal of Applied Sciences*, 11, 966-984. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2021.118070>
- Bondar, O., Vasilenko, K., Makei, O., & Kurmakova, I. (2022). Quantum-chemical characterization of the new [1,2,4]triazolo[1,5-a]pyrimidine derivatives with biological activity. *BHT: Biota. Human. Technology*, 1(1), 98-106. (in Ukrainian)  
Бондар О., Василенко К., Макей О., Курмакова І. Квантово-хімічна характеристика нових біологічно активних похідних [1,2,4]триазоло[1,5-а]піримідину. *ВНТ: Biota. Human. Technology*. 2022. №1(1). С. 98-106.
- Chekman, I. S. (2010). Quantum pharmacology: new direction in materia medica. *Science and innovations*, 6(2), 29 – 35. <https://doi.org/10.15407/scin6.02.029> (in Ukrainian)  
Чекман І.С. Квантова фармакологія: новий напрям у лікознавстві. *Наука та інновації*. 2010. Т. 6. № 2. С. 29 –35. <https://doi.org/10.15407/scin6.02.029>
- Gallo, K., Goede, A., Preissner, R., & Gohlke, B. O. (2022). SuperPred 3.0: drug classification and target prediction-a machine learning approach. *Nucleic Acids Research*, 50(W1), W726–W731. <https://doi.org/10.1093/nar/gkac297>
- Gulseven Sidir, Y., & Sidir, I. (2023). The study on QSAR and relations between molecular descriptors of 5, 8-quinolinequinone derivatives. *Journal of Science*. 36(4): 1795-1809. <https://doi.org/10.35378/gujs.1051216>
- Li, N., Xu, Y., Xia, Q., Bai, C., Wang, T., Wang, L., ... Chen, Y. (2014). Simplified captopril analogues as NDM-1 inhibitors. *Bioorganic & medicinal chemistry letters*, 24(1), 386–389. <https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2013.10.068>
- Lipinski, C. A., Lombardo, F., Dominy, B. W., & Feeney, P. (2001). Experimental and computational approaches to estimate solubility and permeability in drug discovery and development settings. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 46, 3-26. [https://doi.org/10.1016/s0169-409x\(00\)00129-0](https://doi.org/10.1016/s0169-409x(00)00129-0)
- Lukovits, I., Biczó, G., & Pataki, I. (1976). Correlation Between Pharmacological Activity Indices and Quantum Chemical Indices of Some Phenylethylamine Derivatives. In: Tichý, M. (eds) Quantitative Structure-Activity Relationships. *Experientia Supplementum*, 23. Birkhäuser, Basel. [https://doi.org/10.1007/978-3-0348-5795-6\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-0348-5795-6_24)
- Muegge, I. (2003). Selection criteria for drug-like compounds. *Medicinal Research Reviews*, 23(3), 302-321. <https://doi.org/10.1002/med.10041>
- Pedras, M. S. C., & Abdoli, A. (2013). Metabolism of the phytoalexins camalexins, their bioisosteres and analogues in the plant pathogenic fungus *Alternaria brassicicola*. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 21, 4541–4549. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2013.05.026>

Pentyuk, O. O., Kachula, S. O., & Gerych, X. O. (2004). Polymorphism, physiological functions, regulation, role in pathology. *Ukrainian biochemical journal*, 46(5), 16-28. (in Ukrainian)

Петнюх О.О., Качула С.О., Герич О.Х. Цитохром P450E1. Поліморфізм, фізіологічні функції, регуляція, роль у патології. *Український біохімічний журнал*. 2004. Т.46, №5. С.16-28.

Politzer, P., Lane, P., & Murray, J. S. (2016). Electrostatic Potentials, Intralattice Attractive Forces and Crystal Densities of Nitrogen-Rich C,H,N,O Salts. *Crystals*, 6(1), 7, 1-14. <https://doi.org/10.3390/cryst6010007>

Prasanna, S. & Doerksen, R. J. (2009). Topological polar surface area: a useful descriptor in 2D-QSAR. *Current Medicinal Chemistry*, 16(1), 21-41. <https://doi.org/10.2174/092986709787002817>

Raunio, H., Juvonen, R. O., Poso, A., Lahtela-Kakkonen, M., & Rahnasto-Rilla, M. (2016). Common and distinct interactions of chemical inhibitors with cytochrome P450 CYP1A2, CYP2A6 and CYP2B6 enzymes. *Drug Metabolism Letters*, 10, 56–64. <https://doi.org/10.2174/1872312810666151204002456>

Sánchez-Martínez, J. D, Valdés, A., Gallego, R., Suárez-Montenegro, Z. J., Alarcón, M., Ibañez, E., Alvarez-Rivera, G., & Cifuentes, A. (2022). Blood–Brain Barrier Permeability Study of Potential Neuroprotective Compounds Recovered From Plants and Agri-Food by-Products. *Front. Nutr.*, 9, 924596. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.924596>

Tretiak, I. Yu., & Makey, O. P. Syntheses of 2-amino-4-aryl-1,3-oxazoles. *Modern problems of science, education and society: Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference. SPC "Sci-conf.com.ua"*. Kyiv, Ukraine, 2023. P. 363-365. (in Ukrainian).

Третяк І. Ю., Макей О. П. Синтез 2-аміно-4-арил-1,3-оксазолів. *Modern problems of science, education and society. Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference. SPC "Sci-conf.com.ua"*. Kyiv, Ukraine. 2023. P. 363-365.

Velec, H. F., Gohlke, H., & Klebe, G. (2005). DrugScore(CSD)-knowledge-based scoring function derived from small molecule crystal data with superior recognition rate of near-native ligand poses and better affinity prediction. *Journal of Medicinal Chemistry*, 48(20), 6296-6303. <https://doi.org/10.1021/jm050436v>

**Received:** 15.11.2024. **Accepted:** 22.01.2025. **Published:** 03.04.2025.

**Ви можете цитувати цю статтю так:**

Бондар О., Тарасенко І., Курмакова І., Макей О. Квантово-хімічні дескриптори та біологічна активність 2-аміно-4-арил-1,3-оксазолів. *Biota. Human. Technology*. 2025. №1. С. 177-187.

**Cite this article in APA style as:**

Bondar, O., Tarasenko, I., Kurmakova, I., & Makei, O. (2025). Quantum chemical descriptors and biological activity of 2-amino-4-aryl-1,3-oxazoles. *Biota. Human. Technology*, 1, P. 177-187. (in Ukrainian)



**Information about the authors:**

**Bondar O.** [*in Ukrainian: Бондар О.*]<sup>1</sup>, Assoc. Prof., Ph.D. in Tech. Sc., 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

**Tarassenko I.** [*in Ukrainian: Тарасенко І.*]<sup>2</sup>, Master's Degree Candidate, Department of Chemistry, Technology and Pharmacy, email: polkovnicenkoinna@gmail.com  
ORCID: 0009-0004-3892-2120  
T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium"  
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

**Kurmakova I.** [*in Ukrainian: Курмакова І.*]<sup>3</sup>, Sc.D. in Tech. Sc., 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

**Makei O.** [*in Ukrainian: Makeй O.*]<sup>4</sup>, chemist, email: alexmckey2017@gmail.com  
ORCID: 0009-0001-9675-8208  
UKRORGSYNTEZ Ltd.  
Bldg 45, 67 Winston Churchill Street, Kyiv, 02002, Ukraine

---

<sup>1</sup> Data collection, manuscript preparation, statistical analysis.

<sup>2</sup> Statistical analysis.

<sup>3</sup> Study design, data collection, manuscript preparation.

<sup>4</sup> Data collection.

UDC 628.1.033(477.51-25)

DOI: 10.58407/bht.1.25.12



Copyright (c) 2025 Olexandr Smolsky, Olena Bondar, Iryna Kurmakova, Andrij Kotelchuk, Leonid Kotelchuk  
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, Олена Бондар, Ірина Курмакова,  
Андрій Котельчук, Леонід Котельчук**

## **ПИТНА ВОДОПРОВІДНА ВОДА МІСТА ЧЕРНІГІВ ТА ЇЇ ЯКІСТЬ**



**Olexandr Smolsky, Olena Bondar, Iryna Kurmakova,  
Andrij Kotelchuk, Leonid Kotelchuk**

## **DRINKING WATER OF CHERNIGIV AND ITS QUALITY**

### **АНОТАЦІЯ**

В роботі визначені показники якості питної води (твердість загальна, лужність гідрокарбонатна, вміст йонів Кальцію, йонів Магнію, хлорид-йонів, йонів амонію, йонів  $Fe^{2+}$  та  $Fe^{3+}$ ), показник кислотності - рН) системи централізованого водопостачання міста Чернігова. Одержані результати порівняно з нормативними значеннями відповідних показників, наведеними у ДСТУ ISO 6059-2003.

**Мета статті** – оцінити сучасний стан якості води в окремих ділянках водопровідній мережі м. Чернігова.

**Методологія.** Зразки води для дослідження відбиралися в 4-х контрольних точках міської мережі, які відносяться до різних водонапірних станцій, що здійснюють водозабір з Нижньокрейдового та Бучакського горизонтів. Проби води з водопроводів міста відбирали згідно ДСТУ ISO 5667-4-2003. Показники: загальна твердість, лужність гідрокарбонатна, вміст хлорид-йонів визначали загальноприйнятими методами хімічного (тітриметрія) аналізу, вміст йонів амонію та вміст йонів  $Fe^{2+}$  та  $Fe^{3+}$  – методом фотоколориметрії, рН – методом потенціометричного аналізу. Для обґрунтованого висновку про якість питної води для населення м. Чернігова проведено порівняльний аналіз одержаних результатів та нормованих показників.

**Наукова новизна** полягає в порівняльному аналізі хімічних та фізико-хімічних показників зразків води з різних ділянок міської водопровідної мережі (водонапірні станції 1, 3 та 5), що здійснюють водозабір з Нижньокрейдового та Бучакського горизонтів.

**Висновки:** при порівняльному аналізі хімічних та фізико-хімічних показників зразків води з різних ділянок міської водопровідної мережі, що здійснюють водозабір з Нижньокрейдового та Бучакського горизонтів, встановлено перевищення нормативного показника за вмістом йонів  $Fe^{2+}$  та  $Fe^{3+}$  та йонів амонію для зразків води, які відносяться до водонапірної станції «Бобровиця».

**Ключові слова:** водопровідна вода, хімічні та фізико-хімічні показники, загальна твердість

### **ABSTRACT**

**Purpose of the work.** To establish the indicators of drinking water quality (total hardness, bicarbonate alkalinity, content of calcium ions, magnesium ions, chloride ions, ammonium ions, ions  $Fe^{2+}$  and  $Fe^{3+}$ , acidity (pH) of the centralized water supply network in Chernihiv. The results were then compared with the normative values by DSTU ISO 6059-2003.

Tested water samples were collected at four control points which are part of different aquifer stations that draw water from the Lower Cretaceous and Buchakian horizons. The purpose of this article is to evaluate the current state of water quality in specific sections of the Chernihiv water supply network.

**Methodology.** Water samples were collected from the city's water supply systems by DSTU ISO 5667-4-2003. The indicators analyzed included total hardness, bicarbonate alkalinity, chloride ion content, ammonium ion content, ions  $Fe^{2+}$  and  $Fe^{3+}$  content, pH levels. These indicators were assessed using standard methods of chemical and physicochemical (photocolorimetry, potentiometry) analysis.

The **scientific novelty** of this research lies in the comparative analysis of the chemical and physicochemical parameters of water samples collected from control points within different sections of the municipal water supply network. This network sources its water from 1<sup>st</sup>, 3<sup>rd</sup> and 5<sup>th</sup> water-bearing stations that draw from the Lower Cretaceous and Buchaksky aquifers.

**Conclusions:** During a comparative analysis of the chemical and physicochemical parameters of water samples taken from various control points of the municipal water supply network in Chernihiv, that draw from the Lower Cretaceous and Buchaksky aquifers it was found that the standard values for ions  $Fe^{2+}$  and  $Fe^{3+}$  and ammonium ion concentrations were exceeded. These samples were specifically from the water pumping station "Bobrovtytsia".

**Key words:** drinking water, chemical and physicochemical indicators, total hardness

## Постановка проблеми

*Актуальність роботи.* Враховуючи, що за рік людина випиває близько 750 л води (Matvijchuk, et al., 2021), питання забезпечення населення якісною питною водою є однією з важливих проблем для будь-якої країни. Якісна питна вода є однією з найважливіших передумов забезпечення нормальної життєдіяльності людини та збереження здоров'я населення. Адже неякісна вода є чинником ризику виникнення різноманітних патологічних процесів в організмі людини. Всесвітня організація охорони здоров'я відмічає, що 80 % усіх захворювань у світі пов'язані з незадовільною якістю питної води, порушенням санітарно-гігієнічних та екологічних нормативів забезпечення населення водою (Prybylova, 2015; Klimentiev et al., 2002; Berezhnov, 2006).

В містах України, в тому числі у м. Чернігові, забезпечення населення водою здійснюється за допомогою централізованої системи водопостачання. Але у зв'язку з різними причинами (незадовільний стан водогонів, потрапляння у воду небажаних домішок при проведенні ремонтних та профілактичних робіт та ін.) це, навіть при високих показниках якості води з водозабору, не завжди гарантує споживачеві відповідну якість питної води. Тому, як додатковий засіб очищення води, набула популярності локальна підготовка питної води (наприклад, система фільтрації, зворотний осмос) або використання бутильованої води. Для науково-обґрунтованого висновку про якість питної води для населення м. Чернігова необхідно провести моніторинг якості води у різних точках міської мережі централізованого водопостачання.

*Аналіз останніх досліджень та публікацій.* Незважаючи на наявність водних джерел, Україна належить до держав, які мало забезпечені водними ресурсами. Середній показник по забезпеченню одного мешканця прісною водою становить 5,16 тис. м<sup>3</sup>/рік, тоді як ООН

вважає цей показник достатнім на рівні 10-15 тис. м<sup>3</sup>/рік (Shestopalov, et al., 2005). Для порівняння, середнє значення цього показника в Європі – 8,6 тис. м<sup>3</sup>/рік. (Miroshnuchenko, 2021).

Поверхневі води України здебільшого забруднені, тому для питного водопостачання використовують переважно прісні підземні води (Stavytskyu et al., 2011). Підземні води – це єдиний вид корисних копалин, який формується у процесі його експлуатації (Shestopalov et al., 2005). Якщо відбирати тільки динамічну складову підземних вод, не чіпаючи ємнісні запаси, то їх вистачить на необмежений період.

Ресурси підземних вод України складають 61689,2 тис. м<sup>3</sup>/добу, з них з мінералізацією до 1,50 г/дм<sup>3</sup> – 57499,9 тис. м<sup>3</sup>/добу. Розвіданими в Україні вважаються близько 700 родовищ підземних вод, з них 450 родовищ питної та технічної води, 209 мінеральних родовищ, а також по одному родовищу теплоенергетичних і промислових підземних вод. При цьому вони нерівномірно розподілені по регіонах. Більша частина зосереджена в північних і західних областях (Stavytskyu et al., 2011). Значна кількість прогнозних ресурсів підземних вод знаходиться в Чернігівській області і становить 8326,7 тис. м<sup>3</sup>/добу.

Вся територія Чернігівської області у гідрогеологічному відношенні знаходиться в межах Дніпровського артезіанського басейну. В межах Чернігівської області знаходяться наступні водоносні горизонти і комплекси (Prybylova, 2015): четвертинний водоносний горизонт; харківський водоносний горизонт; канівсько-бучацький водоносний горизонт; водоносний комплекс нижньокрейдових і сеноманських відкладів.

Четвертинний водоносний горизонт живиться за рахунок інфільтрації атмосферних опадів. Він характеризується нерівномірним режимом (можливе коливання рівня до 1,5 м), умовно захищеним від забруднення з поверхні землі. Харківський водоносний горизонт є стабільним та напірним. Але він характеризується

значним вмістом йонів  $Fe^{2+}$  та  $Fe^{3+}$ . Канівсько-бучацький водоносний горизонт є напірним зі значними запасами води. Водоносний комплекс нижньокрейдових і сеноманських відкладів забезпечує стале водопостачання якісною водою, але за рахунок значних глибин залягання (400 метрів і більше) при його використанні будівельні роботи потребують значних капіталовкладень.

Оптимальним для влаштування підземних водозаборів є канівсько-бучацький водоносний горизонт, який знаходиться в Чернігівській області на глибині 80-150 м в залежності від геологічних особливостей району.

Централізованим водопостачанням в Чернігівській області забезпечено 56 % населення. При цьому нагальну потребу в додатковому забезпеченні споживачів питною водою мають майже 500 населених пунктах із населенням понад 200 тисяч осіб (Ukrinform, 2021).

Згідно досліджень, проведених ще у 2001-2012 роках (Ponomarenko & Korshun, 2014) водопровідна вода в Чернігівській області була віднесена до другого класу якості як помірно забруднена. В 11 адміністративних громадах області індекс забруднення водопровідної води не перевищував середньо-обласний рівень, який становив  $5,00 \pm 0,30$ . Згідно (Zapolskyj et al., 2000), серед основних причин відхилення стану водопроводів від гігієнічних вимог домінує відсутність водоохоронних зон (76-69 %), необхідного комплексу очисних споруд (13-18 %) та знезаражувальних установок (16-22 %). При цьому відсутність зон санітарної охорони є найбільш характерною для сільських водогонів (понад 50 % об'єктів).

При дослідженні централізованого водопостачання (The quality of drinking water was checked in Chernihiv Oblast, n.d.), що забезпечують питною водою населення Чернігівської області, у першому півріччі 2023 р. встановлено, що з 506 проб води за санітарно-хімічними показниками 62 проби (12,3 %) не відповідали вимогам ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною». Проби з відхиленнями від нормативних показників реєструвалися в тому числі й у м. Чернігові. У досліджених пробах води зафіксовано перевищення нормативних значень за показниками

каламутності, кольоровості, запаху, вмісту йонів  $Fe^{2+}$  та  $Fe^{3+}$ , хлорид- та флюорид-йонів. За мікробіологічними показниками досліджено 498 проб води, з них 13 проб (2,6 %) не відповідали вимогам епідемічної безпеки води питної.

Для вирішення проблеми забезпечення якісною питною водою населення була прийнята Обласна програма «Питна вода Чернігівської області на 2022 – 2026 роки».

Населення м. Чернігів переважно користується водою, що пройшла відповідне очищення на КП «Чернігівводоканал» і відповідає нормативним вимогам. Але існує велика вірогідність погіршення якості питної води після проходження через водогони. Зокрема, корозія металевих труб обумовлює появу продуктів корозії (катіони Феруму) на їх поверхні. З часом цей наліт перетворюється на мул іржі, який потрапляє у питну воду, що тече з крану споживача. Під час аварійних ситуацій на трубопроводних мережах у водопровід можуть потрапляти домішки піску, зважених речовин тощо (Matvijchuk, et al., 2021). У зв'язку з цим, сучасний стан водопостачання питної води у м. Чернігів потребує постійного моніторингу, що й було здійснено у проведеному дослідженні.

Метою роботи було оцінити сучасний стан якості води в окремих ділянках водопровідної мережі м. Чернігова.

### Методологія

Дослідження проводили впродовж вересня-листопада 2024 р. Зразки води відбирали у 4-х точках міської мережі водопостачання з водонасосних станцій: ВНС-1, ВНС-3 та ВНС-5:

– точка 1 – вул. Івана Мазепи (район Міського палацу культури) ВНС-1 «Ялівщина», Нижньокрейдовий горизонт (705-750 м);

– точка 2 – вул. Гетьмана Полуботка, 53 (Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка) ВНС-3 «Бобровиця», Нижньокрейдовий горизонт (720-750 м);

– точка 3 – вул. Володимира Коваленка (ТЦ «Епіцентр») ВНС-3 «Бобровиця», Нижньокрейдовий горизонт (720-750 м);

– точка 4 – вул. Івана Мазепи, 100 ВНС-5 «Хімволокно», Бучакський горизонт (Pg) (100-120 м).

Проби води з водопроводів відбирали згідно ДСТУ ISO 5667-4-2003. Враховували, що вода повинна протікати через кран не

менше 10–15 хвилин. Відібрані проби води негайно доставляли у лабораторію. Фізико-хімічні дослідження проводили не пізніше, ніж через 24 години після відбору проб.

Для аналізу та оцінки придатності води для споживання визначали наступні показники: загальна твердість, лужність гідрокарбонатна, вміст хлорид-йонів, вміст йонів амонію, вміст йонів  $\text{Fe}^{2+}$  та  $\text{Fe}^{3+}$  та pH.

Загальну твердість води визначали методом прямої комплексонометрії з використанням в якості титранту 0,01н розчину трилону Б. Для визначення загального вмісту йонів Кальцію та Магнію аліквоту води титрували в середовищі амоніачного буферного розчину в присутності індикатора хромогену (ЕХЧ). Для визначення кальцієвої твердості аліквоту води титрували у сильно-лужному середовищі шляхом додавання 10 % розчину NaOH за присутності індикатора мурексиду (Lalak & Rohodylo, 2009).

Лужність гідрокарбонатну (твердість карбонатна) визначали методом прямої ацидиметрії. Для цього аліквоти води (25 см<sup>3</sup>) титрували 0,01н стандартизованим розчином хлоридної кислоти в присутності індикатора метилового оранжевого (1% водно-спиртовий розчин) (Okhrimenko & Nafiatullina, 2011).

Вміст хлорид-йонів визначали методом прямої аргентометрії (метод Мора). Аліквоту зразка води (25 см<sup>3</sup>) титрували 0,01н стандартизованим розчином аргентум нітрату у присутності індикатора калію хромату (1 % водний розчин) (Okhrimenko & Nafiatullina, 2011).

Вміст йонів амонію визначали фотоколориметричним методом з використанням реактиву Неслера. Для цього до 2,0 см<sup>3</sup> досліджуваного зразка води додавали 0,2 см<sup>3</sup> 1 % розчину калію-натрію тартрату (сегнетова сіль) та 0,2 см<sup>3</sup> реактиву Неслера. Через 30 хв вимірювали оптичну густину утворених розчинів. Стандартний розчин йонів амонію готували з розрахунку 10,0 мг  $\text{NH}_4^+$ /дм<sup>3</sup>. Оптичну густину розчинів визначали при 400 нм (Okhrimenko & Nafiatullina, 2011).

Вміст йонів  $\text{Fe}^{2+}$  та  $\text{Fe}^{3+}$  (загальне залізо) у зразках води визначали методом фотоколориметрії. Для цього у мірну колбу поміщали 50 см<sup>3</sup> досліджуваної води, 10 см<sup>3</sup> 20 % розчину сульфатної кислоти, 10 см<sup>3</sup> 2,5М розчину калій тіоціанату, 5 мг амоній персульфату та доводили об'єм розчину до

100 см<sup>3</sup>. Паралельно робили дослід зі стандартним розчином, який готувався з х.ч.  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \times 9\text{H}_2\text{O}$  з концентрацією йонів  $\text{Fe}^{3+}$  1,0 мг/дм<sup>3</sup>. Оптичну густину утворених розчинів визначали на фотоелектроколориметрі КФК-2 в кюветах 10 см<sup>3</sup> при довжині хвилі 490 нм (Malyna et al. 2014).

Показник кислотності (pH) води визначали потенціометричним методом із застосуванням pH-метра MW 804 виробництва «Milwaukee» (Bila et al, 2020).

Повторність при визначенні кожного показника становила 5. Статистичну обробку даних проводили з використанням комп'ютерної програми Microsoft Excel загальноприйнятими методами варіаційної статистики з використанням t-критерію Ст'юдента (Tarasova, 2008).

### Результати дослідження

Встановлено, що за показниками загальної твердості всі зразки відповідають нормативним вимогам, проте є суттєва різниця (в 4,5 разів) між різними ВНС м. Чернігова (табл.). Так, вода з ВНС-3 «Бобровиця» (точка 2) характеризується як дуже м'яка, проте зразки з ВНС-5 «Хімволокно» (точка 4) мають максимальне серед досліджених значення (6,55 ммоль-екв/дм<sup>3</sup>), яке наближується до вищої межі.

Показники інших зразків (точка 1 та точка 2) дозволяють оцінити воду як м'яку та корисну для використання в побуті в якості питної води та води для технічних потреб (пральні машини, котли опалення тощо). При цьому вода з ВНС-5 «Хімволокно» (точка 4) потребує тривалого кип'ятіння, як показано нами раніше (Smolskyu & Sukhanova, 2024). Для зниження загальної твердості, яка переважно є карбонатною, з 6,55 до 1,50 ммоль-екв/дм<sup>3</sup> необхідно 30 хв. кип'ятіння.

Вміст катіонів  $\text{Ca}^{2+}$  та  $\text{Mg}^{2+}$  (загальна твердість води) значно менше токсичних рівнів. При цьому концентрація йонів Кальцію для зразка води у точці 4 (91,80 мг/дм<sup>3</sup>) майже в 7 разів перевищує значення, визначені для інших досліджених зразків.

При аналізі зразків води питної м. Чернігова централізованого водопостачання встановлено що загальна лужність не виходить за межі гігієнічних норм (0,5-6,5 ммоль-екв  $\text{HCO}_3^-$ /дм<sup>3</sup>). Слід зазначити, що даний показник для води питної не регламентований.



## Показники якості водопровідної води м. Чернігова

Показник	Нормативне значення*	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4
Загальна твердість води (ммоль-екв/дм <sup>3</sup> )	< 7,0	2,85 ± 0,017	1,47 ± 0,01	1,85 ± 0,01	6,55 ± 0,03
Вміст йонів Ca <sup>2+</sup> (мг/дм <sup>3</sup> )	не регламентовано	17,20 ± 2,24	12,40 ± 1,75	17,00 ± 1,25	91,80 ± 7,24
Вміст йонів Mg <sup>2+</sup> (мг/дм <sup>3</sup> )	не регламентовано	24,00 ± 2,14	10,32 ± 0,97	12,00 ± 0,96	23,72 ± 1,86
Загальна лужність води, ммоль-екв/дм <sup>3</sup>	не регламентовано	4,78±0,32	4,21±0,28	3,77±0,24	5,74±0,41
Вміст загального Феруму у воді, мг/дм <sup>3</sup>	< 0,2	0,16±0,01	0,30±0,03	0,22±0,02	0,20±0,03
Вміст хлорид-йонів, мг/дм <sup>3</sup>	< 250	23,79 ± 1,85	28,05 ± 2,14	27,34 ± 1,97	9,45 ± 0,76
Вміст йонів амонію у воді, мг/дм <sup>3</sup>	< 0,5	0,75±0,05	1,40±0,09	1,37±0,12	0,79±0,06
pH	6,5-8,5	7,37±0,04	7,32±0,02	7,05±0,01	7,08±0,02

**Примітка:** \*Згідно ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» [Чинний від 2019-12-28]. Київ, 2012. 55 с.

Виявлено перевищення нормативного показника по вмісту йонів Fe<sup>2+</sup> та Fe<sup>3+</sup> на ВНС-3 «Бобровиця»: на 48,5 % (для 2 точки відбору) та на 9,5 % (для 3 точки відбору). Перевищення цього показника для точки 4 (ВНС-5) знаходиться у межах похибки визначення. Лише одна з дослідних точок (ВНС-1 «Ялівщина», точка 1) характеризується допустимим вмістом сполук Феруму. Відомо, що вживання такої води значно збільшує навантаження на процес травлення і роботу нирок (Klimentiev, et al., 2002).

Встановлено, що вода ВНС-1, ВНС-2 та ВНС-3 характеризується незначним вмістом хлорид-йонів (табл.). При цьому, найбільш тверда вода (точка 4) характеризується найменшим вмістом хлорид-йонів – 9,45 мг/дм<sup>3</sup>. Це може бути пов'язане з геологічними особливостями Бучакського горизонту (глибина 100-120 м).

При дослідженні зразків води показано перевищення вмісту йонів амонію в усіх зразках від 1,5 до 3 разів, а найбільше для точки 2. Це може бути пов'язане із зноше-

ністю водопровідних мереж та вторинним забрудненням за рахунок корозії внутрішньої поверхні водогонів. Останнє, в свою чергу, може призводити до погіршення органолептичних властивостей води і свідчити про можливість бактеріального зараження середовища. В той же час у глибоких підземних водах можлива присутність сполук амонію, що утворилися за рахунок відновлення нітратів при відсутності кисню. В цьому випадку вміст йонів амонію у воді не вказує на недоброякісність води (Ammonium in drinking water..., n.d.).

Таким чином, у випадку води водопровідної м. Чернігова, яка добувається зі свердловин глибиною 100-750 м, підвищення вмісту сполук амонію не свідчить про погіршення якості води. При цьому тривале вживання води з перевищеним вмістом йонів амонію може привести до порушення кислотно-лужного балансу в організмі. Іони амонію здатні засолювати плазму крові, що може призвести до клітинної гіпоксії (Matvijchuk et al., 2021).

Встановлено, що рН води у всіх досліджених точках відповідає нормам та вказує на слабколужне середовище, що є нормальним та природним.

### Висновки

При порівняльному аналізі хімічних та фізико-хімічних показників зразків води з різних ділянок міської водопровідної

мережі (ВНС 1, 3, 5), що здійснюють водозабір з Нижньокрейдового та Бучакського горизонтів, встановлено перевищення нормативного показника по вмісту йонів  $Fe^{2+}$  та  $Fe^{3+}$  і йонів амонію для досліджених зразків води системи централізованого водопостачання, які відносяться до ВНС-3 «Бобровиця».

### 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 / Conflicts of Interest

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

### Reference

About the regional program “Drinking water of Chernihiv region for 2022-2026” – Chernihiv regional council. New official web portal. (n.d.). Main – Chernihiv Regional Council. New official web portal. <https://chor.gov.ua/component/k2/item/11867-pro-oblasnu-prohramu-pytna-voda-chernihivskoi-oblasti-na-2022-2026?tmpl=component&print=1> (in Ukrainian)

Про обласну Програму «Питна вода Чернігівської області на 2022-2026 роки» – Чернігівська обласна рада. Новий офіційний веб-портал. Головна – Чернігівська обласна рада. Новий офіційний веб-портал. <https://chor.gov.ua/component/k2/item/11867-pro-oblasnu-prohramu-pytna-voda-chernihivskoi-oblasti-na-2022-2026?tmpl=component&print=1>

Ammonium in drinking water and its effect on the human body. (n.d.). Bogorodchansk settlement council. <https://bogo-rada.gov.ua/?p=15869> (in Ukrainian)

Амоній у питній воді та його вплив на людський організм. (б. д.). Богородчанська селищна рада. <https://bogo-rada.gov.ua/?p=15869>

Berezhnov, S. P. (2006). Nutritious water as a factor of National Security. *SES preventive medicine: scientific and scientific publications*, (4), 8-13. (in Ukrainian)

Бережнов С.П. Питна вода як фактор Національної безпеки. *СЕС профілактична медицина: науково-виробниче видання*. 2006. №4. С.8-13.

Bila, T. A., Liashenko, Ye. V., & Okhrimenko, O. V. (2021). Potentiometric method of determining the pH of surface waters. *Aquatic bioresources and aquaculture*, 1, 228-234. <https://doi.org/10.32851/wba.2021.1.17> (in Ukrainian)

Біла Т. А., Ляшенко Є. В., Охріменко О. В. Потенціометричний метод визначення рН поверхневих вод. *Водні біоресурси та аквакультура*. 2021. Вип. 1. С. 228-234. <https://doi.org/10.32851/wba.2021.1.17>

- Ivanova, O. I., & Korzun, V. N. (2010). The quality of drinking water from various sources of water supply and its influence on the health of children of the Brusyliv region. *Hygiene of populated areas*, (56), 104-108. (in Ukrainian)  
Іванова О. І., Корзун В. Н. Якість питної води різних джерел водопостачання та її вплив на стан здоров'я дитячого населення Брусилівського району. *Гігієна населених місць*. 2010. №56. С. 104-108
- Klimentiev, I. M., Babich, I. V. & Filonov V. M. (2002). Nutritional enhancement of drinking water: collection. "Water and Health – 2002 scientific articles of the international scientific and practical conference. Odessa: OTSNTETI, 104–108. (in Ukrainian)  
Клімент'єв І. М., Бабич І. В., Філонов В. М. Питання поліпшення якості питної води. Вода и здоров'є – 2002. Збірник наук. статей міжнар. науково-практ. конф. Одеса: ОЦНТЕІ, 2002. С. 104–108.
- Lalak, N., & Pokhodylo, Ye. (2009). Analysis of methods for determining the total hardness of water. *Measuring technique and metrology*, (70), 179–180 (in Ukrainian)  
Лалак Н., Походило Є. Аналіз методів визначення загальної твердості води. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2009. № 70. С. 179–180.
- Malyna, V. V., Liasota, V. P, & Hryshko, V. A. (2014). *Physical, chemical and biological indicators of water quality: methodological guidelines*. Bila Tserkva National Agrarian University (in Ukrainian).  
Малина В. В., Лясота В. П, Гришко В. А. Фізичні, хімічні та біологічні показники якості води: метод. вказівки. Біла Церква: Білоцерківський національний аграрний університет, 2014. 48 с.
- Matviichuk, N. H., Matviichuk, B. V., & Mozharivska, I. A. (2021). Physico-chemical and bacteriological indicators of the quality of drinking water from various sources. *Water resources and aquaculture*, 1, 147-159. (in Ukrainian)  
Матвійчук Н. Г., Матвійчук Б. В., Можарівська І. А. Фізико-хімічні та бактеріологічні показники якості питної води з різних джерел. *Водні ресурси та аквакультура*. 2021. Вип. 1. С.147-159.
- Miroshnichenko, V. (2021). Water security of the population of Ukraine: level, problems and directions of their solution. *Scientific notes of NaUKMA. Economic Sciences*, 6(1), 99-104. (in Ukrainian)  
Мірошніченко В. Водозабезпеченість населення України: рівень, проблеми та напрями їх розв'язання. *Наукові записки НаУКМА. Економічні науки*. 2021. Том 6, Вип. 1. С. 99-104
- Okhrimenko, O. V., & Hafiatullina, O. H. (2011). Assessment of the quality of drinking water by chemical parameters. *Taurian Scientific Bulletin*, 77, 211–214 (in Ukrainian)  
Охріменко О. В., Гафіатулліна О. Г. Оцінка якості питної води за хімічними показниками. *Таврійський науковий вісник*. 2011. № 77. С. 211–214.
- Ponomarenko, N. P., & Korshun, M. M. (2014). Assessment of the quality of economic and drinking water supply in the districts of Chernihiv region. *Current problems of everyday medicine: Bulletin of the Ukrainian Medical Dental Academy*, 14(2), 37-43. (in Ukrainian)  
Пономаренко Н.П., Коршун М.М. Оцінка якості господарсько-питного водопостачання районів Чернігівської області. *Актуальні проблеми сучасної медицини: Вісник ВДНЗУ «Українська медична стоматологічна академія»*. 2014. Том 14, Вип. 2(46). С.37-43.
- Pribilova, V. M. (2015). Assessment of the storage of drinking groundwater in the Cenomanian-Lower Kreidya aquifer complex on the territory of the Kharkiv region. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"* (43), 75-82. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2015-43-11> (in Ukrainian)  
Прибилова В. М. Оцінка якісного складу питних підземних вод сеноман-нижньокрейдяного водоносного комплексу на території Харківської області. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2015. Вип. 43. С. 75-82. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2015-43-11>

Shestopalov, V., Lialko, V., Hudzenko, V., Drobnokhod, M., Ohnianyuk, M., Rudenko, Yu. ... Yakovliev, Ye. (2005). Groundwater as a strategic resource. *Bulletin of NASc of Ukraine*, (5), 32–39 (in Ukrainian)  
Підземні води як стратегічний ресурс / В. Шестопалов, В. Лялько, В. Гудзенко, М. Дробноход та ін. Вісник НАН України. 2005. Вип. 5. С. 32–39.

Smolskyi, O. S., & Sukhanova, M. O. (2024). Hardness as an indicator of water quality and methods of its determination and elimination. In *Modern technologies among us in the environment: Abstracts of XXIV International Scientific and Practical Conference*, (p. 55-58). European Conference. <https://eu-conf.com/wp-content/uploads/2024/06/MODERN-TECHNOLOGIES-AMONG-US-IN-THE-ENVIRONMENT.pdf> (in Ukrainian)

Смольський О.С., Суханова М.О. Твердість як показник якості води та методи її визначення і усунення. *Modern technologies among us in the environment: Abstracts of XXIV International Scientific and Practical Conference*. P. 55-58.

Stavytskyi, E., Rudko, H., Yakovlieva, Ye. (2011). Strategy for the use of potable groundwater resources for water supply (Vol. 1). Bukrek (in Ukrainian)

Стратегія використання ресурсів питних підземних вод для водопостачання: у 2 т. / За ред. Е.А. Ставицького, Г.І. Рудька, Є.О. Яковлева. Чернівці: Букрек, 2011. Т.1. 348 с.

Tarasova, V. V. (2008). Ecological statistics (with a block-modular form of knowledge control): a textbook. Centre of scientific literature. (in Ukrainian)

Тарасова В. В. Екологічна статистика (з блочно-модульною формою контролю знань): навчальний підручник Київ: Центр учбової літератури, 2008. 392 с.

The quality of drinking water was checked in Chernihiv Oblast. (n.d.). ChEline. <https://cheline.com.ua/news/society/na-chernigivshhini-perevirili-yakist-pitnoyi-vodi-370988> (in Ukrainian).

На Чернігівщині перевірили якість питної води. (б. д.). ЧЕline. <https://cheline.com.ua/news/society/na-chernigivshhini-perevirili-yakist-pitnoyi-vodi-370988>

Ukrinform. (2021, October, 23). 95 wells will be built in Chernihiv Oblast under the "Drinking Water" program. Ukrinform - current news of Ukraine and the world. (in Ukrainian)

На Чернігівщині за програмою «Питна вода» збудують 95 свердловин. Укрінформ – актуальні новини України та світу. <https://www.ukrinform.ua/rubric-yakisne-zhyttia/3337623-na-cernigivsini-za-programou-pitna-voda-zbuduut-95-sverdlovin.html>

Zapolskyi, A. K., Mishkova-Klymenko, N. A., Astrelin, I. M., & Bryk, M. T. (2000). *Physico-chemical basics of wastewater treatment technology*. Kyiv: Libra (in Ukrainian)

Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод / А.К. Запольський, Н.А. Мішкова-Клименко, І.М. Астрелін та ін. К.: Вид-во «Лібра», 2000. 552 с.

Received: 07.01.2024. Accepted: 06.02.2025. Published: 03.04.2025.

**Ви можете цитувати цю статтю так:**

Смольський О., Бондар О., Курмакова І., Котельчук А., Котельчук Л. Питна водопровідна вода міста Чернігів та її якість. *Biota. Human. Technology*. 2025. №1. С. 188-196.

**Cite this article in APA style as:**

Smolsky, O., Bondar, O., Kurmakova, I., Kotelchuk, A., & Kotelchuk, L. (2025). Drinking water of Chernihiv and its quality. *Biota. Human. Technology*, 1, P. 188-196. (in Ukrainian)

**Information about the authors:**

**Smolsky O.** [*in Ukrainian: СМольський О.*] <sup>1</sup>, Assoc. Prof., Ph.D. in Biol. Sc., 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

**Bondar O.** [*in Ukrainian: Бондар О.*] <sup>2</sup>, Assoc. Prof., Ph.D. in Tech. Sc., email: bondar4elena@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-9612-0546 Scopus-Author ID: 54583088800 ResearcherID: AAH-6361-2019  
Department of Physics and Astronomy, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium"  
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

**Kurmakova I.** [*in Ukrainian: Курмакова І.*] <sup>3</sup>, Sc.D. in Tech. Sc., Prof., email: i.kurmakova@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-8916-6546 Scopus-Author ID: 6603630402 ResearcherID: H-2041-2019  
Department of Chemistry, Technology and Pharmacy, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium"  
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

**Kotelchuk A.** [*in Ukrainian: Котельчук А.*] <sup>4</sup>, Assoc. Prof., Ph.D. in Tech. Sc., email: kotelchuka@ukr.net  
ORCID: 0009-0007-6000-6825  
Department of Chemistry, Technology and Pharmacy, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium"  
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

**Kotelchuk L.** [*in Ukrainian: Котельчук Л.*] <sup>5</sup>, Assoc. Prof., Ph.D. in Tech. Sc., email: lkotelchuk42@gmail.com  
ORCID: 0009-0001-4528-281X  
Department of Chemistry, Technology and Pharmacy, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium"  
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

---

<sup>1</sup> Study design, data collection.

<sup>2</sup> Manuscript preparation, statistical analysis, data collection.

<sup>3</sup> Manuscript preparation, statistical analysis, data collection.

<sup>4</sup> Data collection.

<sup>5</sup> Data collection.





Copyright (c) 2025 Oleksii Humeniuk, Inna Trus

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

Олексій Гуменюк, Інна Трус

## АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ КОРОЗІЇ



Oleksii Humeniuk, Inna Trus

## ANALYSIS OF MODERN CORROSION RATE MEASUREMENT METHODS

## АНОТАЦІЯ

В сучасному світі, зі стрімким розвитком інфраструктури, захист від корозії набув особливої важливості. Сучасний світ залежить від складних інженерних конструкцій, таких як мости, будівлі, транспортні засоби, трубопроводи та електростанції, які переважно виготовляються з металів. Ці конструкції піддаються впливу агресивних факторів навколишнього середовища, що може призвести до їх руйнування і значних економічних втрат, а також до потенційної екологічної шкоди. Визначення швидкості корозії є ключовим завданням для впровадження ефективних стратегій захисту та подовження терміну служби металевих конструкцій.

**Мета:** Дослідити сучасні методи визначення швидкості корозії металевих матеріалів та проаналізувати наукові публікації, присвячені практичному використанню цих методів для моніторингу та контролю стану конструкцій. Зокрема, у роботі звернуто увагу на підходи, які дозволяють оперативно отримувати точні дані про інтенсивність корозійних процесів, що є необхідним для підвищення надійності та безпеки інфраструктурних об'єктів.

**Методологія:** Розглянуто як натурні, так і прискорені методи визначення швидкості корозії. Серед натурних досліджено масометричні методи. Прискорені методи включають масометрію за прискорених умов та електрохімічні підходи. Особливу увагу приділено методу поляризаційного опору, що дає змогу оперативно оцінювати корозійну активність середовища. Окрім цього, розглянуто циклічну вольтамперометрію, імпедансну спектроскопію та хронопотенціометрію як додаткові поляризаційні методи. Використання цих методів сприяє розробці більш ефективних стратегій захисту металів від корозійного впливу.

**Наукова новизна:** Систематизовано сучасні методи визначення швидкості корозії, враховуючи їх точність, швидкість отримання даних та придатність до реальних умов експлуатації. Виокремлено переваги методу поляризаційного опору як ключового засобу швидкого та надійного моніторингу корозійних процесів. Аналіз літератури дозволив узагальнити досвід застосування різних підходів у промисловості та наукових дослідженнях, визначити їхні переваги та недоліки, а також сформулювати рекомендації щодо подальшого вдосконалення методик.

**Висновки:** Натурні методи, такі як масометрія, максимально наближені до реальних умов корозії, проте вимагають тривалого часу експозиції, що може бути недоцільним при оперативних дослідженнях. Прискорені методи дають змогу швидко отримати результати, але іноді можуть частково відхилятися від реальної картини корозійних процесів. Електрохімія, зокрема метод поляризаційного опору та інші поляризаційні підходи, забезпечує точне і глибоке розуміння механізмів корозії, дозволяючи виявляти та аналізувати зміни, пов'язані з матеріалом та середовищем. Подальше поєднання натурних та прискорених методів, а також розвиток електрохімічних технік, сприятиме підвищенню ефективності контролю стану конструкцій та поліпшенню стратегій їхнього захисту в реальних умовах експлуатації.

**Ключові слова:** корозія, електрохімія, визначення швидкості корозії, масометрія, поляризаційний опір, циклічна вольтамперометрія, імпедансна спектроскопія, хронопотенціометрія, моніторинг корозії

## ABSTRACT

In the modern world, with the rapid development of infrastructure, corrosion protection has become particularly important. The contemporary world relies on complex engineering structures such as bridges, buildings, vehicles, pipelines, and power plants, which are predominantly made of metals. These structures are exposed to aggressive environmental factors that may lead to their destruction, significant economic losses, and potential environmental damage. Determining the corrosion rate is a key task in implementing effective protection strategies and extending the service life of metallic structures.

**Purpose:** To investigate modern methods for determining the corrosion rate of metallic materials and to analyze scientific publications dedicated to the practical application of these methods in monitoring and controlling the condition of structures. In particular, attention is focused on approaches that enable the prompt acquisition of accurate data on the intensity of corrosion processes, which is essential for improving the reliability and safety of infrastructure facilities.

**Methodology:** Field and accelerated methods for determining corrosion rates were examined. Field methods included gravimetric techniques, while accelerated methods comprised gravimetry under accelerated conditions and electrochemical approaches. Particular attention was paid to the polarization resistance method, which allows for the rapid assessment of the corrosive activity of the environment. In addition, cyclic voltammetry, impedance spectroscopy, and chronopotentiometry were examined as complementary polarization methods. The use of these methods promotes the development of more effective strategies to protect metals from corrosive effects.

**Scientific Novelty:** Modern methods of determining the corrosion rate were systematized, taking into account their accuracy, speed of data acquisition, and suitability for real operating conditions. The advantages of the polarization resistance method were highlighted as a key means for rapid and reliable monitoring of corrosion processes. Literature analysis made it possible to summarize the experience of applying different approaches in industry and research, to identify their advantages and disadvantages, and to formulate recommendations for further improvement of the techniques.

**Conclusions:** Field methods, such as gravimetry, closely reflect real corrosion conditions but require prolonged exposure times, which may be impractical for rapid investigations. Accelerated methods allow for quick results, but may sometimes partially deviate from the actual picture of corrosion processes. Electrochemistry, particularly the polarization resistance method and other polarization approaches, provides an accurate and in-depth understanding of corrosion mechanisms, allowing the detection and analysis of changes related to both the material and the environment. Further combination of field and accelerated methods, as well as the development of electrochemical techniques, will enhance the effectiveness of structural condition control and improve protection strategies under real operating conditions.

**Key words:** corrosion, electrochemistry, corrosion rate determination, mass measurement (gravimetry), polarization resistance, cyclic voltammetry, impedance spectroscopy, chronopotentiometry, corrosion monitoring

## Постановка проблеми

Корозією називають поступовий процес руйнування металу під впливом навколишнього середовища, що відбувається через фізико-хімічні взаємодії між матеріалом і речовинами навколишнього середовища. У результаті цієї взаємодії матеріал втрачає свої робочі властивості. Корозія спричиняє проблеми в різних сферах, оскільки призводить до поломок обладнання та конструкцій, і потребує витрат на ремонт або заміну (Stoev et al., 2019). За деякими оцінками, прямі та непрямі витрати, пов'язані з корозією, складають до 5-10 % від національного доходу багатьох країн. В основному, це витрати на ремонт та заміну обладнання, простої виробництва та додаткові витрати на енергію (Stoev et al., 2019). Корозія впливає на довговічність будівельних конструкцій, транспортних засобів, морських суден та інших об'єктів інфраструктури. Це вимагає постійного моніторингу швидкості корозії, стану конструкцій та проведення спеціальних заходів (Stoev et al., 2019). Корозія може призвести до витоку шкідливих речовин у навколишнє середовище, що в свою чергу може спричинити до забруднення води та ґрунту. Це створює додаткові екологічні ризики та вимагає витрат на ліквідацію

наслідків. Корозія труб водопостачання в сфері житлово-комунального господарства є дуже серйозною проблемою. Вона може призвести до руйнування матеріалу трубопроводів, що може спричинити не тільки втрати води та додаткові витрати на ремонт, але й може залишити мешканців без води на певний час. Крім того, корозія може погіршити якість води, оскільки частинки металу та продукти корозії потрапляють у воду, що може бути шкідливим для здоров'я людей. Вимірювання швидкості корозії є дуже важливим, оскільки дозволяє зрозуміти, наскільки швидко труби зношуються. Знаючи це, можна завчасно планувати ремонт або заміну труб, щоб запобігти аваріям. Це допомагає забезпечити безперебійне постачання якісної води до будинків.

**Метою** роботи є огляд та критичний аналіз сучасних досліджень, що стосуються методів вимірювання швидкості корозії, визначення їх переваг, недоліків та сфери застосування.

## Результати та їх обговорення

### *Загальна класифікація методів вимірювання швидкості корозії*

Існують різні методи вимірювання швидкості корозії, які можна поділити на натурні та прискорені (рис. 1).

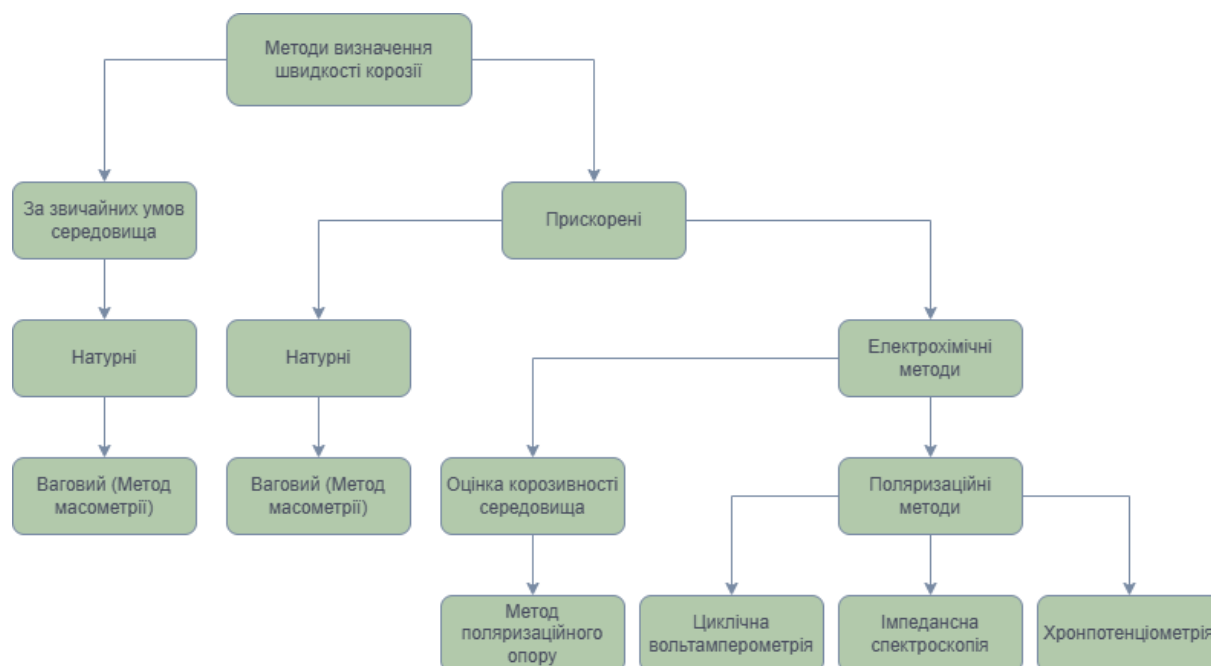


Рис. 1. Схематичне зображення методів вимірювання швидкості корозії

Кожен з них має свої особливості, переваги та недоліки. Найбільш простим є метод масометрії, який може відноситись як до натурних, так і до прискорених методів, в залежності від умов вимірювання. Суть масометричних методів вимірювання швидкості корозії полягає в вимірюванні зміни маси зразка металу після певного часу експозиції в корозійному середовищі.

Натурними методами визначення швидкості корозії називають ті, які передбачають вимірювання швидкості корозії в реальних умовах експлуатації матеріалу. Зразки піддаються експозиції при впливі тих самих факторів корозійного середовища, що і досліджувані об'єкти. До натурних методів визначення швидкості корозії відносяться масометричні (вагові) методи, проведені за звичайних умов. Процедура починається з очищення зразку металу, висушування його і зважування з високою точністю. Наступним етапом є поміщення зразку в корозійне середовище на визначений час. Після закінчення часу експозиції – зразок вилучається з корозійного середовища і з нього видаляються продукти корозії. І останній етап – зважування зразку для визначення втрати маси.

Автори статті (El Ibrahimy & Berdimurodov, 2023) описують метод аналізу втрати маси (масометрія) як найпростіший і широко застосовуваний метод вимірювання корозії в промислових умовах. Для отримання надійних результатів цей метод

вимагає врахування багатьох чинників, фізичні параметри середовища та тривалість експозиції. У статті детально розглядаються основні етапи використання методу масометрії: підготовка зразків, їхнє очищення, занурення в тестове середовище, видалення корозійних продуктів та оцінка результатів (El Ibrahimy & Berdimurodov, 2023).

Масометричний метод не потребує складного або дорогого обладнання, що робить його доступним для широкого застосування. Повторюваність експериментів із різними концентраціями екстракту кавових відходів показала стабільне зменшення швидкості корозії зі збільшенням концентрації інгібітора, що свідчить про надійність методу. Але для отримання значущих результатів необхідно проводити експозицію зразків протягом тривалого часу (1, 3, 5 і 24 години), що може бути непрактичним при потребі швидкого отримання даних (Sherifa Elhady et al., 2024).

До переваг цього методу вимірювання швидкості можна віднести його високу достовірність, так як результати відображають реальний вплив на матеріал в експлуатаційних умовах. Також при використанні даного методу можливо урахувати всі фактори, що можуть впливати на корозію. До недоліків цього методу відноситься потреба в довготривалій експозиції, високі витрати на моніторинг та дослідження зразків (рис. 2).



**Рис. 2. Переваги і недоліки вимірювання швидкості корозії за допомогою методу масометрії (гравиметрії) за звичайних умов**

Прискореними методами визначення швидкості корозії називають методи, які дозволяють швидко отримати достовірні дані про швидкість корозійних процесів. Ці методи поділяють на два основних типи: масометричні за прискорених умов і електрохімічні.

Метод масометрії за прискорених умов полягає у створенні спеціальних умов, що значно підвищують швидкість корозійного процесу, що дозволяє скоротити час експерименту та прискорити отримання результатів. Такі умови можуть включати підвищення температури, збільшення концентрації агресивних середовищ (кислот, солей) або посилення механічного впливу (наприклад, перемішування розчину). Метою прискорених умов є отримання даних про корозійну стійкість матеріалів у стислий термін, що особливо важливо для попереднього відбору матеріалів або інгібіторів. Етапи застосування даного методу відрізняються від етапів застосування методу масометрії за звичайних умов тільки тим, що після підготовки зразків створюються прискорені умови – використовується підвищена температура, збільшується концентрація розчину, змінюється рН середовища, аерація, механічний вплив (перемішування).

У статті (Loto et al., 2021) розглянуто оцінку корозійної стійкості латуні C26000 в різних концентраціях нітратної кислоти ( $\text{HNO}_3$ ) (від 0,5 М до 3,5 М) за допомогою масометричного аналізу. Встановлено, що швидкість корозії латуні зростає зі збільшенням концентрації  $\text{HNO}_3$  та часу експозиції. Теплова обробка (відпал та загартування) не мала істотного впливу на корозійну стійкість латуні в порівнянні з необробленими зразками (Loto et al., 2021).

У роботі (Ofoegbu, 2021) масометричний метод використовується для визначення швидкості корозії вуглецевої сталі. Зокрема, вимірювання втрати маси проводилось після занурення зразків у фруктові соки та розчини  $\text{HCl}$  різної концентрації, що дозволило обчислити швидкість корозії в кожному середовищі.

У статті (Khaldoune et al., 2023) досліджується вплив концентрації кислот і температури розчину на корозію вуглецевої сталі XC48 в умовах кислотного та соляного середовища. Оскільки сталь широко використовується у різних галузях, особливо у будівництві та промисловості, дослідження спрямоване на глибше розуміння поведінки сталі в агресивних середовищах для зменшення ризиків корозії. Масометрія застосовувалася для визначення швидкості корозії сталі, вимірюючи втрату маси зразків після експозиції в корозійному середовищі. Цей метод надав можливість оцінити загальну швидкість корозії на основі втрати маси за різних умов експерименту (Khaldoune et al., 2023).

У роботі (Sayyid et al., 2023) розглядалися механізми корозії металів і сплавів у кислотних середовищах, особливо в соляній кислоті ( $\text{HCl}$ ), яка часто використовується в промислових процесах для видалення продуктів корозії. Це агресивне середовище прискорює корозію металів, таких як вуглецева сталь, що призводить до значного пошкодження обладнання, особливо в нафтовій промисловості, очищенні котлів та інших сферах. В умовах кислотного середовища метали швидше піддаються корозії, оскільки  $\text{HCl}$  сприяє інтенсивному розчиненню металу. Гравіметричні вимірювання в цій статті проводились шляхом занурення зразків низь-

ковуглецевої сталі у розчин 1 М НСІ з інгібіторами та без них. Після заданих періодів експозиції (1, 5, 10, 24, 48 годин) зразки вилучали, очищували за стандартом ASTM G1-03 та зважували для визначення втрати маси. Цей метод дозволив визначити швидкість корозії та оцінити ефективність інгібіторів FRP і PRP, порівнюючи масові втрати в агресивному середовищі з і без інгібіторів (Sayyid et al., 2023).

У статті (Zinad et al., 2020) досліджувалась ефективність нового, екологічно безпечного похідного кумарину, 4-((4-((4-гідрокси-3-метоксибензиліден)аміно)-5-тіоксо-4,5-дигідро-1Н-1,2,4-триазол-3-іл)-метил) (НАТС), як інгібітора корозії для низьковуглецевої сталі в кислому середовищі 1,0 М НСІ. Щоб оцінити вплив інгібітора, проводили гравіметричні дослідження та хімічні розрахунки. Використання кислого середовища прискорювало процес корозії сталі, дозволяючи точніше оцінити захисну дію інгібітора. Додавання НАТС знижувало швидкість корозії шляхом адсорбції на поверхні сталі. Гравіметричні вимірювання проводилися шляхом визначення втрати маси сталевих зразків після занурення в розчин НСІ із різними концентраціями інгібітора НАТС. Швидкість корозії та ефективність інгібітора розраховували, використовуючи втрату маси, площу поверхні зразків, густину та час експозиції. Отримані результати показали, що з підвищенням концентрації НАТС інгібування зростало, тоді як підвищення температури зменшувало його ефективність (Zinad et al., 2020).

У роботі (Loto et al., 2019) досліджували корозію міді в розчині сірчаної кислоти (2 М Н<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) та досліджували ефективність амонію дихромату як інгібітора корозії. Щоб пришвидшити процес корозії, використовували агресивне середовище Н<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, яке прискорює розчинення металу, дозволяючи точніше оцінити ефективність інгібітора в короткі терміни. Гравіметричний метод застосовувався для вимірювання втрат маси зразків міді, занурених у розчин Н<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> з різними концентраціями інгібітора та без нього. Зразки витягували, очищували і зважували через кожні два дні протягом 20 днів. За втратами маси обчислювали швидкість корозії та ефективність інгібітора за допомогою стандартних формул. Оцінка методом гравіметрії показала, що з

підвищенням концентрації інгібітора масові втрати зменшувалися. Ефективність інгібітора була високою, особливо при високих концентраціях амонію дихромату, де швидкість корозії досягала майже нульового значення (Loto et al., 2019).

У роботі (Kesari & Udayabhanu, 2023) був досліджений вплив вітаміну В12 як інгібітора корозії для низьковуглецевої сталі в кислому середовищі (15 % НСІ). Щоб пришвидшити корозію, використовували агресивний розчин НСІ, який прискорює електрохімічні процеси, що призводять до руйнування металу. Це дозволяло ефективніше оцінити захисні властивості інгібітора за відносно короткий час. Гравіметричний метод застосовували для визначення втрати маси зразків сталі після занурення в розчин 15 % НСІ з різними концентраціями вітаміну В12. Зразки занурювали в розчин при різних температурах (від 303 до 333 К) на 6 годин, після чого їх очищували, сушили та зважували. Зміна маси зразків дозволила розрахувати швидкість корозії та ефективність інгібітора. З результатів було виявлено, що з підвищенням концентрації вітаміну В12 ефективність інгібітора зростала, досягаючи 91,73 % при концентрації 100 ppm. Оцінка гравіметричних даних підтвердила, що швидкість корозії знижувалася зі збільшенням концентрації інгібітора. Водночас, при підвищенні температури ефективність інгібітора зменшувалася через зростання дифузії іонів Н<sup>+</sup> та десорбцію водню з поверхні металу (Kesari & Udayabhanu, 2023).

У роботі (Aslam et al., 2020) досліджували ефективність похідного ізоксазолу як інгібітора корозії для низьковуглецевої сталі в кислому середовищі (1 М НСІ). Щоб прискорити корозію, використовували агресивний розчин НСІ, який стимулює електрохімічні реакції, що викликають деградацію металу, тим самим даючи можливість точніше оцінити ефективність інгібітора за короткий час. Гравіметричний метод застосовувався для визначення втрати маси зразків низьковуглецевої сталі після їх занурення в розчин 1 М НСІ з різними концентраціями ізоксазолу. Зразки занурювали на 6 годин при температурі 30 °С, а також перевіряли вплив температур (до 60 °С) на ефективність інгібітора. З підвищенням концентрації ізоксазолу до 300 ppm інгібітор забезпечував максимальну ефективність (96,6 %),



але при збільшенні температури ефективність знижувалась через десорбцію молекул інгібітора з поверхні сталі. Оцінка результатів показала, що інгібітор ефективно знижує швидкість корозії завдяки утворенню захисної плівки на поверхні металу (Aslam et al., 2020).

У статті (Ugi, 2020) досліджували вплив алкалоїду віндоліну як інгібітора корозії для сірого чавуну в середовищі 1 М HCl. Використання кислого середовища HCl пришвидшувало корозію, що дозволяло швидше оцінити ефективність інгібітора. Віндолін було отримано з рослини *Catharanthus roseus*, екстракція та очищення алкалоїду відбувалися за допомогою серії хімічних обробок і фільтрацій. Гравіметричний метод використовували для вимірювання втрати маси чавунних зразків після занурення у розчин HCl з різними концентраціями інгібітора. Зразки витягували, очищували, сушили та зважували після кожного циклу експозиції (3 години та 15 годин), і цей процес повторювали в трикратному повторенні. Гравіметричні дані показали, що корозія значно знижувалася зі збільшенням концентрації віндоліну, досягаючи ефективності інгібування до 99.0 %. Отримані результати підтвердили, що віндолін ефективно знижує швидкість корозії сірого чавуну, діючи як змішаний інгібітор (Ugi, 2020).

До переваг використання прискорених умов для визначення швидкості корозії можна віднести можливість швидкого отримання результатів і, як наслідок, економію ресурсів. Це дозволяє знизити тривалість експериментів і провести первинний відбір матеріалів або інгібіторів корозії на етапі розробки, виявляючи менш стійкі матеріали за короткий час. Такі методи також можуть стимулювати різні механізми корозії, що допомагає оцінити слабкі місця матеріалу при умовах експлуатації та обрати найбільш стійкі покриття або матеріали. Проте використання прискорених умов має і певні недоліки. Результати, отримані в умовах, що суттєво відрізняються від реальних, можуть бути некоректними, адже такі умови не завжди точно відображають поведінку матеріалу в експлуатації. Деякі фактори, як підвищена температура чи концентрація агресивного середовища, можуть призвести до специфічних форм корозії, що не характерні для звичайних умов (рис. 3). Через це для повної оцінки корозійної стійкості часто потрібно поєднувати прискорені методи з іншими, наприклад, електрохімічними методами, щоб підтвердити отримані дані та забезпечити їхню коректність для умов реальної експлуатації.



Рис. 3. Переваги і недоліки вимірювання швидкості корозії за допомогою методу масометрії (гравіметрії) за прискорених умов

**Електрохімічні методи** належать до прискорених методів оцінки швидкості корозії, оскільки вони дають змогу швидко отримати результати й дослідити механізми корозійних процесів. Класифікація цих методів базується на принципах вимірювання та характері отриманих даних. По оцінці корозивності середовища виділяють **метод поляризаційного опору**. За допомогою даного методу можливе вимірювання швидкості корозії в реальному часі. Суть методу полягає у визначенні поляризаційного опору, який є показником, обернено пропорційним струму корозії. Поляризаційним опором називають величину, що характеризує опір металу корозійним процесам і визначається як нахил поляризаційної кривої в точці корозійного потенціалу (Bik et al., 2018; Roberge, 2008).

У статті (Uthaman et al., 2019) досліджувалась корозійна стійкість сталевих арматури в бетоні, модифікованому леткою золою та наночастинками  $\text{CaCO}_3$  і  $\text{TiO}_2$ . Метою було оцінити вплив цих добавок на захист арматури від корозії. Були виготовлені зразки бетону з різними комбінаціями леткої золи та наночастинок: бетон з 40 % леткої золи (FA), бетон з 2 %  $\text{CaCO}_3$  наночастинок (FAC), бетон з 2 %  $\text{TiO}_2$  наночастинок (FAT) та бетон з 1 %  $\text{CaCO}_3$  і 1 %  $\text{TiO}_2$  наночастинок (FATC). Поляризаційний опір вимірювався електрохімічними методами, включаючи вимірювання потенціалу корозії (OCP) та лінійного поляризаційного опору (LPR). LPR-метод дозволяє отримати значення поляризаційного опору, що відображає стійкість до корозії арматури. Результати показали, що бетон з наночастинками  $\text{CaCO}_3$  (FAC) продемонстрував високий поляризаційний опір та низьку швидкість корозії в порівнянні з немодифікованим бетоном. Метод поляризаційного опору (LPR) виявився ефективним для оцінки корозійної стійкості арматури в модифікованому бетоні, оскільки він забезпечив надійні дані про зміну корозійної швидкості та дозволив проводити моніторинг стану арматури в різних умовах впливу (Uthaman et al., 2019).

У роботі (Onyeachu et al., 2019) досліджувалась ефективність 2-(2-піридил)бензімідазолу (2PB) як інгібітора корозії  $\text{CO}_2$  для сталі API X60 у статичних та гідродинамічних умовах. Експерименти проводилися в розчині бурової солі відповідно до

стандарту NACE ID196 при кімнатній температурі. Для кількісного визначення корозійної стійкості використовували електрохімічні методи, такі як електрохімічна імпедансна спектроскопія (EIS), лінійний поляризаційний опір (LPR) та потенціодинамічна поляризація (PDP). Поляризаційний опір вимірювався за допомогою методу LPR, який дозволяє оцінити зміну корозійного опору сталі при впливі корозійного середовища. Цей метод застосовувався як у статичних умовах, так і за умов гідродинамічного потоку, де зразки сталі піддавалися обертанню до 2000 об/хв. Результати показали, що за умов обертання корозійна стійкість сталі з 2PB значно зросла порівняно зі статичними умовами. Це пояснювалося посиленням перенесення інгібітора 2PB до поверхні сталі, що сприяло кращій адсорбції молекул інгібітора на поверхні металу. Аналіз методом ATR-IR показав, що 2PB адсорбується на сталі через N-H групу бензімідазольного кільця, утворюючи захисний бар'єр. Метод поляризаційного опору (LPR) виявився ефективним для оцінки корозійної стійкості сталі в різних умовах, дозволяючи кількісно визначити ступінь захисту, забезпеченого інгібітором. Отримані дані підтвердили, що 2PB значно підвищує корозійну стійкість, особливо за умов гідродинамічного впливу, що робить його перспективним «зеленим» інгібітором корозії для нафтогазової промисловості (Onyeachu et al., 2019).

У статті (Elgebaley et al., 2019) досліджували вплив електрохімічного вилучення хлоридів (ECE) на захист сталевих арматур в бетонних конструкціях від корозії, викликаній хлоридами. Основна увага приділялася зміні характеристик інтерфейсу сталь-бетон, зокрема поляризаційному опору, швидкості корозії та міцності зчеплення після обробки ECE. Дослідження охоплювало різні типи цементу, в тому числі звичайний портландцемент (CEM I 42.5N) з різним вмістом лугів та СЗА, а також змішаний цемент зі шлаком та з добавкою мікрокремнезему. Поляризаційний опір (LPR) використовували як один з основних показників для оцінки корозійної стійкості сталевих арматур. Його вимірювали методом лінійного поляризаційного опору, тобто не руйнівним методом вимірювання корозійної активності в бетоні до і після обробки ECE. Оцінку корозійної

стійкості проводили як для бетонів з внутрішнім джерелом хлоридів, так і для тих, що піддавалися зовнішньому впливу хлоридів. Результати показали, що обробка ЕСЕ є ефективною для видалення хлоридів з інтерфейсу сталь-бетон, що знижує корозійний струм і потенціал корозії. Проте, обробка ЕСЕ також вплинула на зниження міцності зчеплення між сталлю та бетоном, незалежно від типу цементу. Найбільш високу міцність і поляризаційний опір продемонстрував бетон із мікрокремнеземом, який забезпечував додаткову стійкість до корозії. Метод поляризаційного опору виявився ефективним для визначення змін у корозійній стійкості сталеві арматури після обробки ЕСЕ, дозволяючи точно оцінити ступінь корозійного захисту (Elgebaley et al., 2019).

У роботі (Irshad et al., 2022) досліджувалася ефективність композиту із сірки та високоструктурованого провідного вуглецю, який використовувався в якості катоду в літій-сірчаних батареях, зокрема роль властивостей вуглецю, вмісту сірки та її розподілу у формуванні внутрішнього опору й здатності до розряду. Попри значну площу поверхні високоструктурованого провідного вуглецю, катоди на його основі показали низьку швидкість розряду та високий поляризаційний опір. Поляризаційний опір катода оцінювався за допомогою електрохімічної імпедансної спектроскопії (EIS), яка дозволила розділити внески поляризаційного опору та заряду, що виникають під час різних процесів на широкому діапазоні часових шкал. Вимірювання EIS проводили при різних рівнях глибини розряду (DOD) з частотами від 100 кГц до 0,1 Гц при синусоїдальному збудженні 5 мВ. Перед вимірюванням комірки розряджалися на низькій швидкості (C/50), дозволяючи стабілізувати напругу перед кожним заміром імпедансу. Для аналізу отриманих даних використовувалась модель еквівалентної схеми з подальшим підбором параметрів. Використання вуглецю Ketjen-black у поєднанні з Super-P® забезпечує більш рівномірний розподіл активних компонентів, що зменшує поляризацію та покращує загальну електрохімічну ефективність батареї (Irshad et al., 2022).

У статті (AL-Ameeri et al., 2021) досліджено вплив карбонізації бетону на проникність хлоридів і швидкість корозії арматури в залізобетоні з тріщинами,

викликаними навантаженням. Проведено експерименти з використанням прискореного впливу CO<sub>2</sub> і хлоридів на бетонні зразки з різними співвідношеннями вода/цемент та ширинами тріщин. Метод поляризаційного опору використовувався для оцінки швидкості корозії, а потенціал пів-елемента застосовувався для визначення стану корозійної активності. Встановлено, що карбонізація та наявність тріщин суттєво підвищують проникність бетону для хлоридів і пришвидшують корозію арматури, що залежить від ширини тріщин та якості бетону (AL-Ameeri et al., 2021).

У роботі (Sohail et al., 2020) досліджувалася корозійна стійкість чотирьох типів арматури для залізобетону (низько-вуглецева сталь, високоякісна сталь, сталь з епоксидним покриттям і високолегована хромова сталь) в суворих кліматичних умовах, зокрема під впливом циклічного замочування в розчині NaCl і висушування. Для оцінки корозійної швидкості використовували метод поляризаційного опору та електрохімічну імпедансну спектроскопію (EIS). Метод поляризаційного опору дозволив визначити опір до переносу заряду та порівняти рівень корозії серед різних матеріалів. Дослідження виявило, що сталь з епоксидним покриттям забезпечує найкращий захист від корозії навіть за наявності незначних пошкоджень покриття, а високолегована хромова сталь демонструє вищу стійкість до корозії, ніж низько-вуглецева та високоякісна сталь. Використання цих матеріалів може значно збільшити довговічність бетонних конструкцій у агресивних середовищах (Sohail et al., 2020).

У статті (Pradipta et al., 2019) досліджували ефективність екстракту зеленого чаю як «зеленого» інгібітора корозії в порівнянні з комерційним інгібітором кальцію нітриту для сталеві арматури, зануреної в розчин хлоридів у цементному розчині. Використовували метод поляризаційного опору для визначення швидкості корозії. Було встановлено, що при рівній концентрації зеленого чаю і нітриту кальцію вони мають подібну ефективність (51–70%), але при однаковому об'ємі ефективність зеленого чаю була вище ніж нітриту кальцію (75–80 % проти 14–24 %). Зелений чай діяв як інгібітор корозії змішаного типу дії, збільшуючи поляризаційний опір і знижуючи анодний нахил,

утворюючи захисний шар на поверхні арматури. Основними компонентами, відповідальними за цю активність, були (-)-епігалокатехін галат, (-)-епікатехін галат і катехін (Pradipta et al., 2019).

Метод поляризаційного опору має значні переваги, які роблять його одним із найефективніших способів оцінки корозійних процесів. Він дозволяє швидко та точно визначати швидкість корозії в реальному часі без пошкодження досліджуваних матеріалів, що є важливим для моніторингу об'єктів у реальних умовах

експлуатації. Метод забезпечує можливість детального аналізу електрохімічних реакцій, дозволяючи досліджувати механізми корозії, оцінювати ефективність покриттів та інгібіторів корозії. Його можна використовувати як у статичних, так і в динамічних умовах, що робить його універсальним. Водночас метод має певні недоліки, серед яких висока чутливість до зовнішніх факторів, таких як температура, стан поверхні чи концентрація агресивного середовища (рис. 4).



Рис. 4. Переваги і недоліки вимірювання швидкості корозії за допомогою методу поляризаційного опору

Існують також інші прискорені електрохімічні методи визначення швидкості корозії, які належать до поляризаційних, і один із них – **циклічна вольтамперометрія**. Цей метод є модифікацією лінійної вольтамперометрії, у якій після досягнення певного потенціалу відбувається реверсування напрямку сканування, що дозволяє отримати інформацію про зворотні електрохімічні процеси. Циклічна вольтамперометрія виконується шляхом поступового підвищення потенціалу з часом (лінійний розгін) до заданого значення – потенціалу реверсу. Після досягнення цієї точки потенціал починає змінюватися у зворотному напрямку, створюючи симетричний трикутний профіль (Bard & Faulkner, 2001). Переваги і недоліки вимірювання швидкості корозії за допомогою методу циклічної вольтамперометрії зазначені на рис. 5.

Ще одним електрохімічним методом визначення швидкості корозії є метод **імпедансної спектроскопії**. Цей метод базується на застосуванні сигналу змінного струму або напруги до робочого електрода з подальшим визначенням його реакції. До робочого електроду прикладають синусоїдальний сигнал і вимірюють його вихідну реакцію струму або напруги на різних частотах при різних умовах, таких як різна температура, і інше. Потенціостат обробляє вимірювання струму та напруги в часі, створюючи серію значень імпедансу для кожної аналізованої частоти. Цей набір значень імпедансу та частот відомий як «імпедансний спектр» (Canales, 2022; Karmakar, 2024). Переваги і недоліки вимірювання швидкості корозії за допомогою даного методу зазначені на рис. 6.



Рис. 5. Переваги і недоліки вимірювання швидкості корозії за допомогою методу циклічної вольтамперометрії



Рис. 6. Переваги і недоліки вимірювання швидкості корозії за допомогою методу імпедансної спектроскопії

Останнім електрохімічним методом визначення швидкості корозії в даній роботі буде розглянуто метод **хронопотенціометрії**. Хронопотенціометрія – електрохімічна техніка, при якій контрольований постійний струм протікає між електродами, а потенціальна відповідь вивчається як функція часу відносно відповідного еталонного електроду. Перевага цієї техніки над хроноамперометрією полягає в корекції омичного ефекту, який є неминучим в електрохімічних процесах. Оскільки омичний ефект тут постійний, викривлення хронопотенціограм можна виправити, застосувавши постійне потен-

ціальне зміщення. На відміну від хроноамперометрії, де струм є залежною змінною, в хронопотенціометрії щільність струму можна варіювати для отримання бажаного перехідного часу, який є ключовим параметром досліджень (Chowdhury et al., 2017). Переваги і недоліки вимірювання швидкості корозії за допомогою цього методу зазначені на рис. 7.

Враховуючи переваги й обмеження методів вимірювання швидкості корозії можна зробити висновок, що метод поляризаційного опору виглядає найперспективнішим для розвитку і подальшого впровадження в практику.





Рис. 7. Переваги і недоліки вимірювання швидкості корозії за допомогою методу хронопотенціометрії

### Висновки

У даній роботі було проведено аналіз різних методів дослідження корозійної стійкості металів, таких як масометрія, імпедансна спектроскопія, метод поляризаційного опору, хронопотенціометрія та циклічна вольтамперометрія. Масометрія є простим і доступним методом, але вона потребує тривалого часу для проведення експериментів і не дозволяє отримати динамічну інформацію про процеси корозії. Імпедансна спектроскопія забезпечує широкий спектр даних про корозійні процеси, проте потребує спеціального обладнання і складного аналізу результатів. Метод поляризаційного опору виділяється як перспективний завдяки можливості швидкого визначення швидкості корозії з мінімальним впливом на систему. Він також дозволяє отримувати

точні результати в режимі реального часу, що робить його особливо цінним для моніторингу корозії в польових умовах. Хронопотенціометрія дозволяє спостерігати за кінетикою процесів на поверхні металу, проте вимагає точного регулювання умов експерименту і специфічного обладнання. Циклічна вольтамперометрія дає змогу досліджувати механізми корозії та електрохімічні процеси, але її результати залежать від багатьох факторів, зокрема від стану поверхні електрода і точності інструментів. Отже, хоча кожен із методів має свої переваги й обмеження, метод поляризаційного опору виглядає найперспективнішим для розвитку і подальшого впровадження в практику, оскільки він забезпечує оптимальне співвідношення між точністю, швидкістю та можливістю використання в реальних умовах.

### Фінансування / Funding

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

### Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Не застосовується / Not applicable.

### Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Не застосовується / Not applicable.

### Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

### Конфлікт інтересів / Conflicts of Interest

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

## References

- AL-Ameeri, A. S., Rafiq, M. I., & Tsioulou, O. (2021). Combined impact of carbonation and crack width on the Chloride Penetration and Corrosion Resistance of Concrete Structures. *Cement and Concrete Composites*, 115, 103819. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103819>
- Aslam, J., Aslam, R., Alrefae, S. H., Mobin, M., Aslam, A., Parveen, M., & Hussain, C. M. (2020). Gravimetric, electrochemical, and morphological studies of an isoxazole derivative as corrosion inhibitor for mild steel in 1M HCl. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(11), 7744-7758. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.09.008>
- Bard, A. J., Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical methods: fundamentals and applications*. Department of Chemistry and Biochemistry University of Texas at Austin., 239-243. From <https://tinyurl.com/4sb74md3>
- Bik, M. V., Buket, O. I., & Vasyliiev, H. S. (2018). *Metody zakhystu obladnannia vid korozii ta zakhyst na stadii proektuvannia*. KPI im. Ihoria Sikorskoho. (in Ukrainian) <https://tinyurl.com/5yfy2zy2>  
Бик М. В., Букет О. І., Васильєв Г. С. Методи захисту обладнання від корозії та захист на стадії проектування: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 318 с. <https://tinyurl.com/5yfy2zy2>
- Canales, C. P. (2022). C. Electrochemical Impedance Spectroscopy and Its Applications. *21st Century Nanostructured Materials—Physics, Chemistry, Classification, and Emerging Applications in Industry, Biomedicine, and Agriculture*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.101636>
- Chowdhury, N. R., Kumar, R., & Kant, R. (2017). Theory for the chronopotentiometry on rough and finite fractal electrode: Generalized Sand equation. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 802, 64-77. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.08.039>
- El Ibrahim, B., & Berdimurodov, E. (2023). Weight loss technique for corrosion measurements. In *Electrochemical and Analytical Techniques for Sustainable Corrosion Monitoring* (pp. 81-90). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15783-7.00011-6>
- Elgebaley, R., Elshazly, Y., & Elsalamawy, M. (2019). Role of cement type on performance change of reinforcing steel due to chloride extraction. *Construction and Building Materials*, 208, 444-453. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.022>
- Elhady, S., Zaki, E. G., El-Azabawy, O. E., & Fahim, I. S. (2024). Electrochemical evaluation of green corrosion inhibitor based on ground coffee waste in Petroleum fields. *Results in Engineering*, 21, 101880. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101880>
- Irshad, A., Elizalde-Segovia, R., Jayathilake, B. S., Zayat, B., & Narayanan, S. R. (2022). Understanding the Role of Carbon Mixtures on the Polarization of Sulfur Electrodes in Lithium-Sulfur Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 169(11), 110528. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac9c35>
- Karmakar, S. (2024). Impedance Spectroscopy for Electroceramics and Electrochemical System. *arXiv preprint arXiv:2406.15467*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.15467>
- Kesari, P., & Udayabhanu, G. (2023). Investigation of Vitamin B12 as a corrosion inhibitor for mild steel in HCl solution through gravimetric and electrochemical studies. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(4), 101920. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101920>
- Khaldoune, M., Hafid, H., Allaoua, N., Khiari, A., & Gherraf, N. (2023). Gravimetric and electrochemical investigation of the impact of various factors on xc48 carbon steel corrosion in different environments. *Revue roumaine de chimie*, 68(9), 453-462. <https://doi.org/10.33224/rrch.2023.68.9.06>

Loto, C. A., Fayomi, O. S. I., Loto, R. T., & Popoola, A. P. I. (2019). Potentiodynamic Polarization and Gravimetric Evaluation of Corrosion of Copper in 2M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and its inhibition with Ammonium Dichromate. *Procedia Manufacturing*, 35, 413-418. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.05.061>

Loto, R. T., Loto, C., & Ohwofasa, O. (2021, March). Gravimetric and data analysis of the corrosion resistance behaviour and inhibition of C26000 brass in dilute HNO<sub>3</sub> solution. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1117, No. 1, p. 012002). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1117/1/012002>

Ofoegbu, S. U. (2021). Comparative gravimetric studies on carbon steel corrosion in selected fruit juices and acidic chloride media (HCl) at different ph. *Materials*, 14(16), 4755. <https://doi.org/10.3390/ma14164755>

Onyeachu, I. B., Obot, I. B., Sorour, A. A., & Abdul-Rashid, M. I. (2019). Green corrosion inhibitor for oilfield application I: Electrochemical assessment of 2-(2-pyridyl) benzimidazole for API X60 steel under sweet environment in NACE brine ID196. *Corrosion Science*, 150, 183-193. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.02.010>

Pradipta, I., Kong, D., & Tan, J. B. L. (2019). Natural organic antioxidants from green tea inhibit corrosion of steel reinforcing bars embedded in mortar. *Construction and Building Materials*, 227, 117058. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117058>

Roberge, P. R. (2008). Corrosion engineering: principles and practice. (No Title). From <https://lccn.loc.gov/2008005204>

Sayyid, F. F., Mustafa, A. M., Ibrahim, S. I., Mohsin, M. K., Hanoon, M. M., Al-Kaabi, M. H., ... & Al-Amiery, A. A. (2023). Gravimetric Measurements and Theoretical Calculations of 4-Aminoantipyrine Derivatives as Corrosion Inhibitors for Mild Steel in Hydrochloric Acid Solution: Comparative Studies. *Corrosion Science and Technology*, 22(2), 73-89. <https://doi.org/10.14773/cst.2023.22.2.73>

Sohail, M. G., Kahraman, R., Alnuaimi, N. A., Gencturk, B., Alnahhal, W., Dawood, M., & Belarbi, A. (2020). Electrochemical behavior of mild and corrosion resistant concrete reinforcing steels. *Construction and Building Materials*, 232, 117205. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117205>

Stoev, P. I., Lytovchenko, S. V., Girka, I. O., & Hrytsyna, V. T. (2019). *Chemical corrosion and protection of metals: Textbook*. V. N. Karazin Kharkiv National University. (in Ukrainian) <https://tinyurl.com/m3ux5k96>

Хімічна корозія та захист металів : навчальний посібник / [П. І. Стоєв, С. В. Литовченко, І. О. Гірка, В. Т. Грицина]. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. 216 с. <https://tinyurl.com/m3ux5k96>

Ugi, B. U. (2020). Effects of nitrogen atoms in vindoline alkaloids as Fe<sup>2+</sup> ions inhibitor in corrosion of gray iron in dilute HCl environment: potentiodynamic polarization, gravimetric analysis and SEM. *Journal of Materials and Environmental Science*, 11(8), 1274-1285. From [https://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol11/vol11\\_N8/JMES-2020-111119-Ugi.pdf](https://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol11/vol11_N8/JMES-2020-111119-Ugi.pdf)

Uthaman, S., George, R. P., Vishwakarma, V., Harilal, M., & Philip, J. (2019). Enhanced seawater corrosion resistance of reinforcement in nanophase modified fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 221, 232-243. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.070>

Zinad, D. S., Jawad, Q. A., Hussain, M. A. M., Mahal, A., Mohamed, L., & Al-Amiery, A. A. (2020). Adsorption, temperature and corrosion inhibition studies of a coumarin derivatives corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium: gravimetric and theoretical investigations. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 9(1), 134-151. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2020-9-1-8>

**Ви можете цитувати цю статтю так:**

Гуменюк О., Трус І. Аналіз сучасних методів вимірювання швидкості корозії. *Biota. Human. Technology*. 2025. №1. С. 197-210.

**Cite this article in APA style as:**

Humeniuk, O., & Trus I. (2025). Analysis of modern corrosion rate measurement methods. *Biota. Human. Technology*, 1, P. 197-210. (in Ukrainian)

**Information about the authors:**

**Humeniuk O.** [*in Ukrainian: Гуменюк О.*] <sup>1</sup>, PhD student, e-mail: alexei.humeniuk@gmail.com  
ORCID: 0009-0001-8655-1334  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
37 Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine, 03056

**Trus I.** [*in Ukrainian: Трус І.*] <sup>2</sup>, Dr. Sci., Associate Professor, e-mail: inna.trus.m@gmail.com  
ORCID: 0000-0001-6368-6933 Scopus Author ID: 56152219600  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
37 Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine, 03056

---

<sup>1</sup> Data collection, manuscript preparation.

<sup>2</sup> Study design, manuscript preparation.



# **SHORT COMMUNICATIONS**

## **КОРОТКІ ПОВІДОМЛЕННЯ**







Copyright (c) 2025 Iryna Shyndanovina

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/).

Iryna Shyndanovina

**COSMARIUM MANDOSII VAN WESTEN & COESEL 2020  
(ZYGNEMATOPHYCEAE, STREPTOPHYTA), NEW SPECIES FOR UKRAINE,  
THE SECOND RECORD IN THE WORLD AFTER AUTHORS DESCRIPTION  
IN THE NETHERLANDS**



Ірина Шиндановіна

**COSMARIUM MANDOSII VAN WESTEN & COESEL 2020  
(ZYGNEMATOPHYCEAE, STREPTOPHYTA) – НОВИЙ ДЛЯ УКРАЇНИ ВИД,  
ДРУГА ЗНАХІДКА В СВІТІ ПІСЛЯ ЙОГО ПЕРШООПISУ В НІДЕРЛАНДАХ**

## ABSTRACT

A new species of desmid algae - *Cosmarium mandosii* Van Westen & Coesel 2020, first described in the Netherlands in 2020, was discovered in the quarry pond "Zemsnariad" (Mlynovyshche Lake) in Chernihiv city (Ukraine).

The aim of the study was to investigate the morphology of a representative of the species *C. mandosii*, discovered in the quarry pond (Chernihiv city), as well as to provide a taxonomic list of algae *Zygnematophyceae*, *Streptophyta* of the quarry pond "Zemsnariad".

Samples for algological analysis (periphyton of submerged parts and old leaves of *Phragmites* sp. and squeezed liquid *Ceratophyllum demersum*) were collected in June 2024 in the quarry pond "Zemsnariad", which is located within Chernihiv city, close to its historical part. Both live samples and those fixed with 4 % formalin (for further storage and examination) were studied. Microscopic examination of the samples was carried out using light microscope Zeiss Imager A2 and Canon R6 camera. Some chemical parameters of the water were determined: 1) pH and electrical conductivity using portable multimeters H&M COM-100 and H&M PH-200; 2) the content of ions  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}_{\text{total}}$  according to regulated methods in the local state laboratory of the Ministry of Health of Ukraine. It was established that the dimensional features of the representative of the species *C. mandosii* found in Chernihiv coincide with the data of other authors. This is the first published discovery of *Cosmarium mandosii* Van Westen & Coesel 2020 outside the Netherlands after the first description of this species in 2020. The algoflora of Ukraine is enriched with a new rare species. This is also the first published study of *Zygnematophyceae*, *Streptophyta* algae of the quarry pond "Zemsnariad" (Chernihiv, Ukraine). *C. mandosii* was discovered together with 18 other taxa of desmid algae.

The area of *C. mandosii* distribution in Europe was expanded. Illustrations of the Ukrainian material were provided. "Zemsnariad" quarry pond (Mlynovyshche Lake) is a locality of the new for Chernihiv Polesie species *Cosmarium vexatum* West 1892, and the new for Ukraine and rare for the world species *C. mandosii*.

**Key words:** *Cosmarium mandosii*, desmid algae, quarry pond, Polesie, biodiversity of the transformed environment, Chernihiv

## АНОТАЦІЯ

Новий вид десмідієвих водоростей - *Cosmarium mandosii* Van Westen & Coesel 2020, вперше описаний у Нідерландах у 2020 році, виявлено у кар'єрній водоймі Земснаряд (оз. Млиновище) в місті Чернігові (Україна).

Метою роботи було дослідити морфологію представника виду *C. mandosii*, виявленого у кар'єрній водоймі (м. Чернігів), а також навести таксономічний список водоростей *Zygnematophyceae*, *Streptophyta* кар'єрної водойми Земснаряд (оз. Млиновище).

Проби для альгологічного аналізу (перифітон занурених частин і старих листків *Phragmites* sp. і віджата рідина *Ceratophyllum demersum*) відбирали у червні 2024 році в кар'єрній водоймі Земснаряд (оз. Млиновище), яка знаходиться в межах м. Чернігова, близько до його історичної частини. Досліджували як живі зразки, так і фіксовані 4 %-ним формаліном (для подальшого зберігання та дослідження). Мікроскопічне дослідження зразків проводили за допомогою світлового мікроскопа Zeiss Imager A2 та камери Canon R6. Визначали деякі хімічні параметри води: 1) pH і електропровідність з використанням портативних мультиметрів H&M COM-100

і Н&М РН-200; 2) вміст іонів  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}_{\text{заг}}$  за регламентованими методиками в місцевій державній лабораторії Міністерства охорони здоров'я України.

Встановлено, що розмірні особливості знайденого в Чернігові представника виду *C. mandosii* співпадають із даними інших авторів. Це перша оприлюднена знахідка *Cosmarium mandosii* Van Westen & Coesel 2020 за межами Нідерландів після першоопису цього виду в 2020 році. Альгофлора України збагатилася новим рідкісним таксоном. Ця публікація є першим оприлюдненим дослідженням водоростей *Zygnematophyceae*, *Streptophyta* кар'єрного ставка Земснаряд (оз. Млиновище) (Чернігів, Україна). *C. mandosii* було виявлено разом із ще 18 таксонами десмідієвих водоростей.

Розширено ареал розповсюдження *C. mandosii* в Європі, надано ілюстративний матеріал української клітини. Кар'єрна водойма Земснаряд (оз. Млиновище) – це локалітет нового для Чернігівського Полісся виду *Cosmarium vexatum* West 1892, та нового для України і рідкісного для світу виду *C. mandosii*.

**Ключові слова:** *Cosmarium mandosii*, десмідієві водорості, кар'єрна водойма, Полісся, біорізноманіття трансформованого середовища, Чернігів

Algological samples collected in the quarry pond "Zemsnariad" (Mlynovyshche Lake) in Chernihiv in 2024. Samples were not very rich in *Zygnematophyceae* species – 19 taxa in total (compare Shyndanovina, 2024) but one interesting *Cosmarium* species attracted our attention and was identified as *Cosmarium mandosii* Van Westen & Coesel 2020. The aim of the study was to investigate the morphology of a representative of the species *C. mandosii*, discovered in the quarry pond (Chernihiv city), as well as to provide a taxonomic list of algae *Zygnematophyceae*, *Streptophyta* of the quarry pond "Zemsnariad".

The authors of this species indicated that this species is probably quite common in Europe (Netherlands, Austria, Czech Republic, France), but *C. mandosii* should be compared with two morphologically similar species: *C. vogesiacum* Lemaire and *C. polonicum*

Raciborski. Further in the differential diagnosis the authors provided the following details:

The difference between *C. mandosii* is in the general shape of the cell and the structure of the ornamentation of the central part of the half-cell, which is very clearly seen when the cell is in the apical view.

*C. polonicum* like *C. vogesiacum* is characterized by cells slightly larger in length compared to width and trapezoidal semicells. The cells of *C. mandosii* are approximately the same in length and width, shape of their semicells is elliptical-oblong (or bean-like), which makes their appearance noticeably different (see Van Westen & Coesel, 2020).

Locality: the quarry pond "Zemsnariad" (Mlynovyshche Lake) is situated in one of the historical parts of Chernihiv city, that is called Liskovytsia (Fig. 1).



Fig. 1. View of the quarry pond "Zemsnariad" (Mlynovishche Lake) and Liskovytsia district from the bell tower of the Trinity-Ilyinsky Monastery. Photo by © Vynogradov A.I., 2019



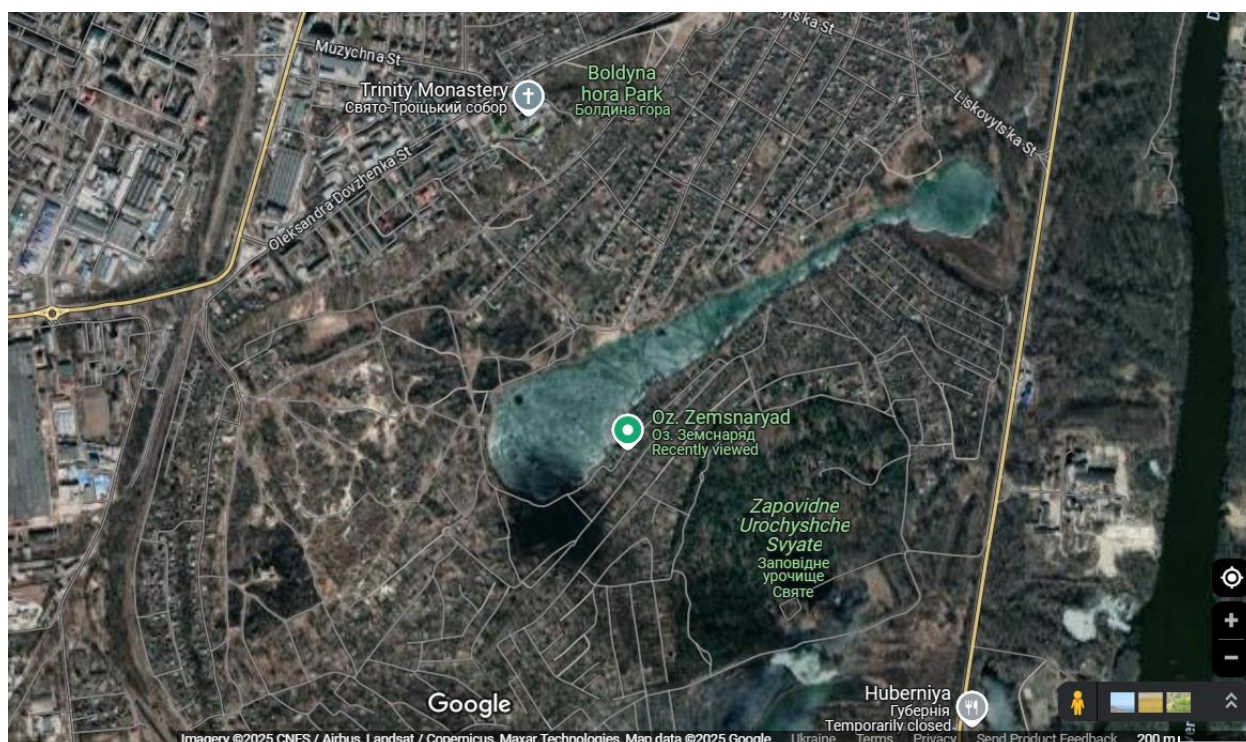
Liskovytsia is a historical district of Chernihiv city, stretching from the foot of the Dytynets (inner center of an old town) fortifications to the Bogorodychna (Theotokos) Lavra, founded by St. Anthony of the Caves.

The territory of Liskovytsia includes Vovcha Slobidka, Boldyny Hills, Kholodny Yary and part of the floodplain near the Holy Grove and Lake Mlynovyshche, the historical name of which is associated with the water mills of the

Yelets Monastery, which were once built on the banks of the Strizhen River.

The “Zemsnariad” quarry pond was formed on the place of the old bed of the Strizhen River as a result of several transformations caused by human activity.

Initially, in 1863, a dam was built for the purposes of building the St. Petersburg - Kyiv tract. As a result of this construction, the bed of the Strizhen River was changed and directed into another part of the Desna River (Fig. 2).



**Fig. 2. View of the quarry pond “Zemsnariad” (Mlynovyshche Lake) among the urban area of Chernihiv city. Imagery:**

**©CNES/Airbus, Landsat/Copernicus, Maxar Technologies, 2025.**

**Map data: ©Google, 2025**

Further transformation took place in the end of the 20th century and was associated with the sand extraction by open excavation and hydraulic fill methods. After the completion of the sand extraction works and filling the basin with ground and rain waters, a local name “Zemsnariad” (means dredging machine) appeared and is still being used by inhabitants of Chernihiv in parallel to its historical name “Mlynovyshche Lake”.

The pond is located in the floodplain (right bank) of the Desna River, and it is fed with ground and rain waters. The total area of the pond is 0,26 km<sup>2</sup>, length – 1,2 km, average width 0,07 km, maximum width – 0,1 km, coordinates: 51°28'18"N 31°17'22"E (Fig. 2). The banks are flat and alternate with wetland or marshy areas in some low places. The pond freezes in winter (Fig. 3).



Fig. 3. “Zemsnariad” (Mlynovishche Lake) frozen in winter. Photo by I. Shyndanovina

The samples were examined alive as well as fixed with 4 % formalin for further storage and examination. Water chemical variables (pH and electrical conductivity) were determined by H&M COM-100 and H&M PH-200 portable multimeters. Microscopic examination of the samples was carried out using light microscope Zeiss Imager A2 equipped with Canon R6 digital camera.

The hydrochemical parameters (ion concentrations) of “Zemsnariad” pond (Mlynovishche Lake) were measured in the local state laboratory of the Ministry of Health of Ukraine. The hydrochemical parameters of the pond are: pH: 7.4; EC: 1050, ion concentrations are indicated in Table 1.

Table 1

The hydrochemical parameters of “Zemsnariad” Pond (Mlynovishche Lake)

№	Ion designation	Ion concentration, mg/L
1.	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<0.2
2.	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	72.9
3.	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.57
4.	Cu <sup>2+</sup>	<0.1
5.	Zn <sup>2+</sup>	<0.1
6.	Mn <sup>2+</sup>	<0.01
7.	Fe <sub>total</sub>	<0.1

The following publications were used in the identification process: Palamar-Mordvintseva, 1986; Palamar-Mordvintseva, 2005; Lenzenweger, 1999; Coesel & Meesters, 2007; Van Westen & Coesel, 2020; Van Westen, 2024.

*Cosmarium mandosii* Van Westen & Coesel 2020 was found in samples collected in June 2024: periphyton of submerged parts and old leaves of *Phragmites* sp. and squeezed liquid of *Ceratophyllum demersum* L. (Fig. 4).





Fig. 4. Quarry Pond Zemsniariad (Mlynovyshche Lake), one of the points of samples collection in June 2024

Diagnosis: cells are approximately the same in length and width, deeply constricted. Sinus linear, closed for the most part, basal angles are widely rounded. Semicells are elliptically elongated, bean-shaped when viewed from the front. The semicell has two swellings (median nodules) in the center that carry a different number of granules. A row of four granules can be seen above the isthmus. The edges of the semicell, as well as the area between the edge and the middle, are provided with evenly distributed small granules. Semicells are round in the side view, elliptical in the apical view, with two noticeable median nodules on both sides. Chloroplast is with one central pyrenoid.

Microphotographs of living material in three projections and ornamentation of the central part of the semicell are reproduced on Fig. 5.

Only one cell was measured. The dimensions of the Ukrainian cell are within the size range given for the material from the Netherlands (Table 2).

*Cosmarium mandosii* Van Westen & Coesel 2020 was found together with another 18 taxa of desmid algae (see Table 3):

*Closterium* Nitzsch ex Ralfs – 5 taxa;  
*Cosmarium* Corda ex Ralfs – 11 taxa;  
*Pleurotaenium* Nägeli – 1 taxon; *Staurastrum* Meyen ex Ralfs – 2 taxa.

*Cosmarium vexatum* West 1892 is a new species for Chernihiv Polesie.

Despite the anthropogenic pressure, “Zemsniaryad” quarry pond (Mlynovyshche Lake) is a locality of rare species of desmid algae. 19 taxa, including *C. mandosii*, are new for the flora of desmids of Ukraine, and *Cosmarium vexatum* West 1892 is a new species for Chernihiv Polesie. This gives an additional reason (Shyndanovina, 2024) to the statement that transformed by man ecosystems (for example, quarry pond) can be a valuable locality of desmid algae diversity.

The area of *Cosmarium mandosii* Van Westen & Coesel 2020 distribution in Europe extends to the Chernihiv Polesie (Ukraine). Additionally, *Cosmarium vexatum* West 1892 distribution in Ukraine also includes Chernihiv Polesie now.

The illustrations of the Ukrainian material presented in this publication will serve as a comparative basis for floristic studies of desmid algae.

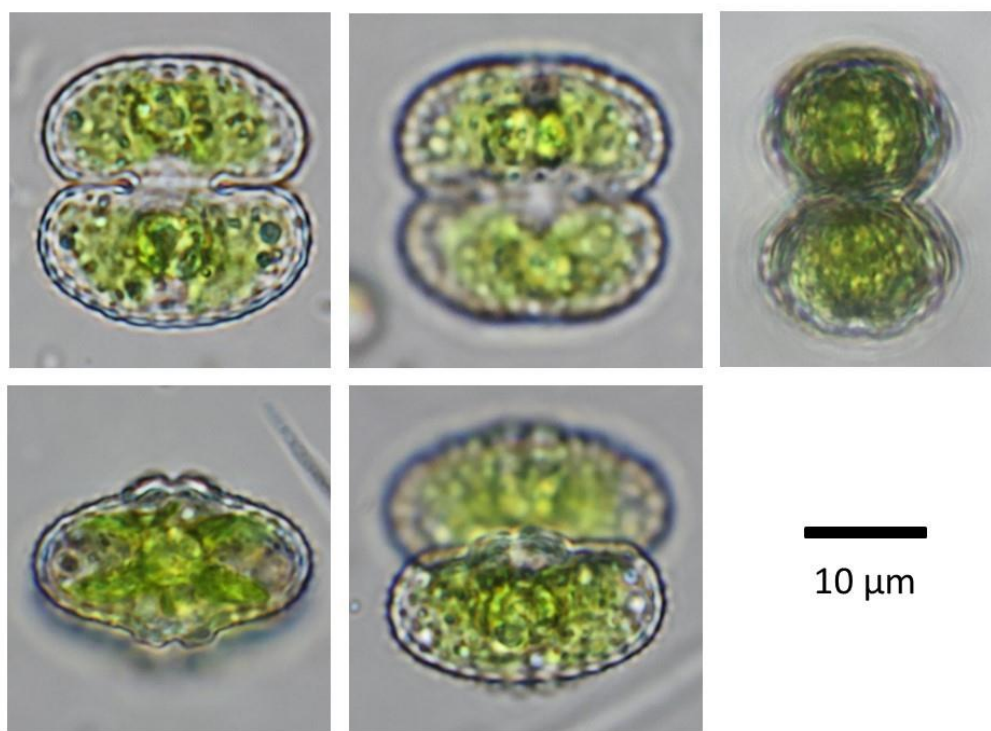


Fig. 5. *Cosmarium mandosii* Van Westen & Coesel 2020, microphotographs of the cell found in the quarry pond “Zemsnariad” (Mlynovyshche Lake) Chernihiv (Ukraine). Photos by I. Shyndanovina

Table 2

Comparative table of dimension of *Cosmarium mandosii* Van Westen & Coesel 2020 by different authors

Dimensional features	Our cell from “Zemsnariad”, μm	Van Westen & Coesel, 2020, μm	Westen, 2024, μm
Length	23.19	20-25	22-27
Breadth	23.38	19-24	21-25
Thickness	15.21	12-14	13.5-15
Isthmus	7.90	7-9	7-9
Length / breadth ratio	0.99	-	0.98-1.11

Table 3

Taxonomic list of Desmidiaceae (Zygnematophyceae, Streptophyta) of the quarry pond Zemsnariad (Mlynovyshche Lake)

Rank	Name	Author
Class	<i>Zygnematophyceae</i>	Round ex Guiry 2013
Subclass	<i>Zygnematophycidae</i>	Melkonian, Gontcharov & Marin 2019
Order	<i>Desmidiaceae</i>	Bessey 1907
Family	<i>Closteriaceae</i>	Bessey 1907
Genus	<i>Closterium</i>	Nitzsch ex Ralfs
	1 <i>Closterium acerosum</i>	Ehrenberg ex Ralfs 1848
	2 <i>Closterium aciculare</i>	T. West 1860
	3 <i>Closterium ehrenbergii</i>	Meneghini ex Ralfs 1848



Rank	Name	Author
	4 <i>Closterium moniliferum</i>	Ehrenberg ex Ralfs 1848
	5 <i>Closterium tumidulum</i>	F.Gay 1884
<b>Family</b>	<b><i>Desmidiaceae</i></b>	<b>Ralfs 1848</b>
<b>Genus</b>	<b><i>Cosmarium</i></b>	<b>Corda ex Ralfs</b>
	1 <i>Cosmarium botrytis</i>	Meneghini ex Ralfs 1848
	2 <i>Cosmarium granatum</i>	Brébisson ex Ralfs 1848
	3 <i>Cosmarium laeve</i>	Rabenhorst 1868
	4 <i>Cosmarium mandosii</i>	Van Westen & Coesel 2020
	5 <i>Cosmarium obtusatum</i>	(Schmidle) Schmidle 1898
	6 <i>Cosmarium punctulatum</i>	Brébisson 1856
	7 <i>Cosmarium regnellii</i>	Wille 1884
	8 <i>Cosmarium reniforme</i>	(Ralfs) W.Archer 1874
	9 <i>Cosmarium subgranatum</i>	(Nordstedt) Lütkemüller 1902
	10 <i>Cosmarium subimpressulum</i>	Borge 1894
	11 <i>Cosmarium vexatum</i>	West 1892
<b>Genus</b>	<b><i>Pleurotaenium</i></b>	<b>Nägeli, 1849</b>
	1 <i>Pleurotaenium trabecula</i>	Nägeli 1849
<b>Genus</b>	<b><i>Staurastrum</i></b>	<b>Meyen ex Ralfs, 1848</b>
	1 <i>Staurastrum crenulatum</i>	(Nägeli) Delponte 1877
	2 <i>Staurastrum punctulatum</i>	Brébisson 1848

### 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.

## References

- Coesel, P. F. M. & Meesters, K. (2007). Desmids of the Lowlands. *Mesotaeniaceae* and *Desmidiaceae* of the European Lowlands. KNNV Publishing
- Lenzenweger, R. (1999): Desmidiaceenflora von Österreich, Teil 3. In J. Cramer (Ed.), *Bibliotheca Phycologica 104*. Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung
- Palamar-Mordvintseva, G. M. (1986). *Identification manual of the freshwater algae of Ukrainian RSR. Issue VIII. Conjugates – Conjugatophyceae. Part 2. Desmids – Desmidiales*. Naukova Dumka. (in Ukrainian)  
Паламар-Мордвинцева Г. М. Визначник прісноводних водоростей Української РСР, вип. 8. Кон'югати — *Conjugatophyceae*. Ч. 2. Десмідієві — *Desmidiales* / Відп. ред. М.М. Голлербах. Київ: Наук. думка, 1986. 320 с.
- Palamar-Mordvintseva, G. M. (2005). *Flora of algae in continental water bodies of Ukraine. Desmid algae. Part 2: Desmidiaceae*. Akademperiodica (in Ukrainian)  
Паламар-Мордвинцева Г.М. Флора водоростей континентальних водойм України: Десмідієві водорості. Вип. 1, Ч. 2 Desmidiaceae. Київ: Академперіодика, 2005. 578 с.
- Petlovany, O. A., Tsarenko, P. M. (2014). Desmidiales. In Tsarenko, P.M., Wasser, S.P. & Nevo, E. (Eds.), *Algae of Ukraine: diversity, nomenclature, taxonomy, ecology and geography. Volume 4: Charophyta*. (pp. 61-448). Koeltz Scientific Books
- Shyndanovina, I. (2024). Desmidiales (Zygnematophyceae, Streptophyta) of the quarry pond Zavodske – a hotspot of desmids diversity in Chernihiv Polesie, Ukraine. *Biota. Human. Technology*, 3, 9–49
- Van Westen, M. C. & Coesel, P. F. M. (2020). Taxonomic notes on desmids from the Netherlands III, with a description of five new species. *Phytotaxa*, 443(1), 107-115
- Van Westen, M. C. (2024). *Sieralgen in Drenthe*. Privéuitgave

Received: 03.02.2025. Accepted: 18.03.2025. Published: 03.04.2025.

### Ви можете цитувати цю статтю так:

Shyndanovina I. *Cosmarium mandosii* Van Westen & Coesel 2020 (*Zygnematophyceae, Streptophyta*), new species for Ukraine, the second record in the world after authors description in the Netherlands. *Biota. Human. Technology*. 2025. №1. С. 212-219.

### Cite this article in APA style as:

Shyndanovina, I. (2025). *Cosmarium mandosii* Van Westen & Coesel 2020 (*Zygnematophyceae, Streptophyta*), new species for Ukraine, the second record in the world after authors description in the Netherlands. *Biota. Human. Technology*, 1, P. 212-219.

### Information about the author:

**Shyndanovina I.** [*in Ukrainian: Шиндановина І.*], PhD student., email: i.shyndanovina@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-5683-4894 Scopus-Author ID: 57219437858  
Department of Ecology, Geography and Environmental Management  
T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium"  
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine



# **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.

**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.

### **Technical requirements for the preparation of the manuscript of the article:**

The manuscript should be submitted in \*.doc or \*.rtf (MSWord) format: font – Times New Roman, keel – 14, line spacing – 1.5 intervals of the computer standard. Margins: top and bottom – 2 cm, right – 1.5 cm, left – 3 cm. Paragraph – 1.0 cm. Pages are not numbered, text is typed without hyphens.

### **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. Individuals who do not meet these criteria may be listed in the Acknowledgements section.
4. 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.
5. 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**.

6. 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.
7. Through the line - the main text of the article according to the structural elements: **statement of the problem, research results, conclusions**.
8. 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..

9. The article continues with a list of references. It should contain only those sources to which reference is made in the text. The word "**References**" is written aligned. References are presented in alphabetical order using the Latin alphabet. References that are originally written in languages using the Latin script are presented in the original language, formatted according to [APA style](#) indicating the language of publication in round brackets. References, which are written in the original language with Cyrillic writing, are presented in two paragraphs as follows: first, the translation into English (not transliteration!), formatted according to [APA style](#), and in the second paragraph - in the original language according to [DSTU 8302:2015. Bibliographic reference. General provisions and rules of compilation](#)

#### For example:

Tkachuk, N. V., & Zelena, L. B. (2022). Biosafety in the formation of professional competences of bachelors from the courses "Microbiology and virology with the basics of immunology" and "Genetics". *Environmental sciences*, 2(41), 41-145. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.2-41.24> (in Ukrainian)

Ткачук Н. В., Зелена Л. Б. Біобезпека при формуванні фахових компетенцій бакалаврів з курсів «Мікробіологія і вірусологія з основами імунології» та «Генетика». *Екологічні науки*. 2022. №2(41). С.141-145. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.2-41.24>

10. Tables, diagrams, figures, diagrams must be author's, not copied from other publications and numbered. They are placed without a paragraph in the center of the page directly after a link to them in the text of the article or on the next page. The word "Table" and its number are written on top aligned to the right, and the name of the table is aligned in the center on the line below. Illustrations (figures, block diagrams, graphs) must be made in one of the graphic editors. Figures can be submitted in color. Flow charts and figures (must be grouped) are additionally provided as separate files in electronic form. Illustrations are signed from the bottom aligned with the center.

11. Formulas and letter designations of quantities are typed in the MathType-Equation editor and presented in text or a separate line without paragraph indent, aligned with the center, numbered with Arabic numerals in round brackets on the right side of the page.

12. The following signs are used in the text of the article: quotation marks (« »), apostrophe ('), a dash (-) instead of a hyphen (-). A colon (:) is placed without a space.

13. Words, phrases and sentences in the Latin language in the article are highlighted in italics, regardless of the language of the article.

### Examples:

... the plant extract was carried out *in vitro* by the Kirby-Bauer disc...

... are important *in vivo* biomarkers for biomonitoring...

Taxa (all) and syntaxa of vegetation are given only in Latin and highlighted in italics. The author(s) of the taxon or syntaxon should be indicated in normal font at the first mention in each structural part of the article (title, abstracts and keywords in any language, the actual text (body) of the article), as well as captions to tables and figures.

If species belonging to one genus are mentioned in the article, and between these mentions there are no mentions of species of other genera, then after the first writing of the full species name, the name of the species should be given further in the text, shortening the name of the genus to the first letter with a dot. This rule applies within any structural part of the article, as well as captions to tables and figures.

An example of writing the Latin names of taxa and syn taxa in one article:

*PLATANUS* L. GENUS IN TRANSCARPATIA

РІД *PLATANUS* L. НА ЗАКАРПАТТІ

### Abstract

... the coexistence of other *Platanus* L. species... *Picea abies* (L.) Karst.

... the study of the genus *Platanus* in the ... as *Platanus acerifolia* (Aiton) Willd. is a...

... the genus *Platanus* in Transcarpathia will.... *Picea abies*...

The spruce forest communities of the Dnieper part of Eastern Polesie belong to the *Eu-Piceetum* (Cajander 1921) Keilland-Lund 1967 and *Querco-Piceetum* (Matuszkiewicz 1952) Matuszkiewicz et Polakowska 1955 associations of the *Piceion excelsae* Pawłowski et al. 1928 alliance of the *Piceetalia excelsae* Pawłowski et al. 1928 order of the *Vaccinio-Piceetea* Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939 class.

The natural spruce forest of the *Querco-Piceetum* association...

**Key words:** introduced plants, *Picea abies* (L.) Karst., *Platanus* L., Transcarpathia

## Анотація

... міжвидових гібридів роду *Platanus* L. ...is *Picea abies* (L.) Karst.

... гібриди роду *Platanus* ... *Picea abies*...

... належить до виду *Platanus acerifolia* (Aiton) Willd. і має статусу...

Угруповання ялинових лісів придніпровської частини Східного Полісся належать до асоціацій *Eu-Piceetum* (Cajander 1921) Keilland-Lund 1967 та *Quercu-Piceetum* (Matuszkiewicz 1952) Matuszkiewicz et Polakowska 1955 з союзу *Piceion excelsae* Pawłowski et al. 1928 порядку *Piceetalia excelsae* Pawłowski et al. 1928 класу *Vaccinio-Piceetea* Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939.

Природний ялинник асоціації *Quercu-Piceetum*...

**Ключові слова:** Закарпаття, рослини-інтродуценти, *Picea abies* (L.) Karst., *Platanus* L.

## Formulation of the problem

In ... two primary progenitors: *Platanus orientalis* L. and *P. occidentalis* L. Additionally, there are several natural hybrid species, including the *P. acerifolia* (Aiton) Willd., *P. cuneata* Willd., *P. digitata* Gord., *P. hispanica* Münchh. and others.

## Results and discussion

*P. occidentalis* also known simply as “sycamore”, ..., *Ficus sycómorus* L., which is ... and even the *Acer pseudoplatanus* L....

...*Platanus orientalis* along with...

## Fig. 1: *Platanus acerifolia* (Aiton) Willd (photo by Ivan Dzurenko)

...*P. occidentalis* is notably affected by the fungus *Gloeosporium nervisequum* (Fuckel) Sacc....

... *Eu-Piceetum* (Cajander 1921) Keilland-Lund 1967 association...

## Table. Structure of the *Eu-Piceetum* (Cajander 1921) Keilland-Lund 1967 association

...*Eu-Piceetum* is formed in an ecotone area ...

... both *Platanus occidentalis* and *P. acerifolia* grew...

... phytocenoses of the *Epilobietea angustifolii* Tx. et Preising ex von Rochow 1951 and *Robinietae* Jurko ex Hadač et Sofron 1980 classes are formed...

## Conclusions

... Among these species is *P. acerifolia*.

..., phytocenoses of the *Epilobietea angustifolii* class is...

14. After References, information about each author is provided **in English**:

- First line – **Surname, Name [in Ukrainian: Прізвище Ім'я]** <sup>1</sup>[\[i\]](#), 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.

[\[i\]](#)<sup>1</sup> Indicate the contribution of the corresponding (1 – first, 2 – second, etc.) author to the publication choosing from the list: 1) study design, 2) data collection, 3) statistical analysis, 4) manuscript preparation, 5) funds collection.

## **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.

**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.

### **Технічні вимоги до оформлення рукопису статті:**

Рукопис подавати у форматі \*.doc чи \*.rtf (MSWord): шрифт – Times New Roman, кегель – 14, відстань між рядками – 1,5 інтервалу комп'ютерного стандарту. Поля: верхнє і нижнє – 2 см, праве – 1,5 см, ліве – 3 см. Абзац – 1,0 см. Сторінки не нумеруються, текст набирається без переносів.

### **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.
3. Наступний рядок – назва статті англійською, українською та польською (якщо стаття написана польською мовою) або англійською та українською (якщо стаття написана українською мовою), великими буквами, без абзацного відступу, вирівняно центром. Назва має бути короткою (не більше 8 слів) і відображати зміст статті.
4. Наступний рядок – анотація англійською, польською (якщо стаття написана польською) та українською мовами (із зазначенням слова «**АНОТАЦІЯ**» відповідною мовою, по центру; текст анотації з абзацним відступом, вирівняно шириною тексту, інтервал між рядками одинарний). Обсяг – **не менше 1800, але не більше 2200 символів з пробілами**. Анотація повинна містити виділені жирним текстом наступні структурні елементи: **мета роботи, методологія, наукова новизна, висновки**.



5. Наступний рядок – ключові слова (словосполучення «Ключові слова» напівжирним шрифтом, абзацний відступ, вирівняно шириною тексту, інтервал між рядками одинарний). Не більше п'яти ключових слів.

6. Через рядок – основний текст статті відповідно до структурних елементів: **постановка проблеми, результати дослідження, висновки.**

7. У тексті статті мають бути посилання на всі джерела у списку літератури. Редакція наполегливо рекомендує авторам уникати використання застарілих та неоцифрованих посилань. Для цього рекомендуємо авторам **проводити комплексні та актуальні пошуки** в глобальних бібліографічних базах даних, таких як Scopus, Web of Science, PubMed та інші, залежно від тематики дослідження.

Посилання на літературні джерела подаються у круглих дужках з вказанням прізвищ(а) автора(ів) у хронологічному порядку, наприклад:

один автор – Lukash, 2019;

два автори – Tkachuk & Zelena, 2020;

три автори та більше – Kurmakova et al., 2021.

Посилання на видання без авторів здійснюється відповідно до правил [APA стилю](#).

8. Після основного тексту статті подається наступна інформація:

**Фінансування:** Вкажіть одне з двох тверджень: відсутність зовнішнього фінансування або деталі про отриманий грант. Переконайтеся у правильності написання назв фінансових установ, перевіривши їх на офіційному ресурсі. Помилки можуть ускладнити отримання фінансування в майбутньому.

**Етичне схвалення:** Цей розділ потрібен для документування етичного схвалення дослідження. Для робіт з людьми вкажіть відповідність Гельсінській декларації та схвалення етичного комітету. Для досліджень на тваринах надайте інформацію про схвалення протоколу. Якщо етичне схвалення не потрібне, обґрунтуйте це або вкажіть "Не застосовується".

**Інформована згода:** Обов'язковий розділ для досліджень за участю людей. Підтвердіть отримання згоди від учасників або поясніть її відсутність. Особливо важливо для випадків, коли учасників можна ідентифікувати – потрібна письмова згода на публікацію.

**Доступ до даних:** Опишіть, де можна знайти дані вашого дослідження. Надайте посилання на архіви даних. Навіть якщо нові дані не створювались або є обмеження доступу, потрібно це зазначити. Детальніше дивіться у наступних вказівках:

Статус доступності даних	Рекомендована заява про доступність даних
Відкритий доступ у репозиторії	Усі первинні дані дослідження знаходяться у вільному доступі в [репозиторій] за посиланням [ідентифікатор].
Обмежений доступ за запитом	Через [причина обмеження] дані можна отримати, звернувшись до відповідального автора.

Дані від сторонніх організацій	Доступ обмежений правами власності. Дані надані [організація] і доступні [умови доступу] за їхнім дозволом.
Тимчасове обмеження для комерціалізації	Після завершення періоду комерціалізації дані стануть доступними в [репозиторій] за посиланням [ідентифікатор].
Особливі умови доступу	Через [конкретна причина, наприклад, дані є частиною поточного дослідження або через технічні/часові обмеження] прямий доступ до даних обмежений. Для отримання доступу звертайтеся до [контакт].
Дані з відкритих джерел	Використані дані доступні в [репозиторій], [ідентифікатор]. Джерела даних: [список публічних ресурсів].
Відсутність нових даних	Дослідження не створювало нових даних, базується на теоретичному аналізі.
Дані у складі публікації	Усі дані представлені безпосередньо в статті та додатках. За додатковою інформацією звертайтеся до авторів.
Дані за запитом	Первинні дані дослідження автори нададуть на запит зацікавлених осіб.

**Подяки:** Місце для визнання допомоги, що не входить до авторського внеску чи фінансування – адміністративна підтримка, технічна допомога, надані матеріали тощо.

**Конфлікт інтересів:** автори повинні розкривати будь-які фінансові чи особисті зв'язки, які можуть вплинути на об'єктивність їхнього дослідження. Це включає:

- **Фінансування:** гранти, спонсорство або інші форми фінансової підтримки.
- **Зайнятість/працевлаштування:** робота в організаціях, які можуть мати інтерес у публікації.
- **Фінансові інтереси:** володіння акціями, патентами або отримання гонорарів.
- **Нефінансові інтереси:** особисті або професійні відносини, які можуть вплинути на дослідження.

Чітко заявіть про наявність або відсутність конфліктів інтересів. Опишіть будь-який вплив спонсорів на проведення дослідження та публікацію результатів. За відсутності такого впливу, вкажіть це окремо, зазначивши «Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів». Розкриття конфлікту інтересів спрямоване на забезпечення прозорості та дозволяє читачам самостійно оцінити можливий вплив.

9. Далі подається список літератури. У ньому мають бути лише ті джерела, на які зроблено посилання у тексті. Слово «**References**» пишеться вирівняно. Список посилань на джерела інформації подається у алфавітній послідовності за латиницею. Джерела, які в оригіналі написані мовами, де використовується латинський шрифт, подаються мовою оригіналу, оформленому за [APA стилем](#). Джерела, які написані у оригіналу мовою з кириличним написанням, подаються двома абзацами таким чином: спочатку переклад англійською мовою (не транслітерація!), оформлений за [APA стилем](#) із зазначенням мови видання у круглих дужках, а у другому абзаці – мовою оригіналу за [ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання](#).

#### Наприклад:

Tkachuk, N. V., & Zelena, L. B. (2022). Biosafety in the formation of professional competences of bachelors from the courses “Microbiology and virology with the basics of immunology” and

"Genetics". *Environmental sciences*, 2(41), 41-145. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.2-41.24> (in Ukrainian)

Ткачук Н.В., Зелена Л.Б. Біобезпека при формуванні фахових компетенцій бакалаврів з курсів «Мікробіологія і вірусологія з основами імунології» та «Генетика». *Екологічні науки*. 2022. №2(41). С.141-145. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.2-41.24>

10. Таблиці, схеми, рисунки, діаграми повинні бути авторськими, а не скопійованими з інших видань та пронумеровані. 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 TRANSCARPATHTIA

РІД *PLATANUS* L. НА ЗАКАРПАТТІ

#### Abstract

... the coexistence of other *Platanus* L. species... *Picea abies* (L.) Karst.

... the study of the genus *Platanus* in the ... as *Platanus acerifolia* (Aiton) Willd. is a...

... the genus *Platanus* in Transcarpathia will.... *Picea abies*...

The spruce forest communities of the Dnieper part of Eastern Polesie belong to the *Eu-Piceetum* (Cajander 1921) Keilland-Lund 1967 and *Quercu-Piceetum* (Matuszkiewicz 1952) Matuszkiewicz et Polakowska 1955 associations of the *Piceion excelsae* Pawłowski et al. 1928 alliance of the *Piceetalia excelsae* Pawłowski et al. 1928 order of the *Vaccinio-Piceetea* Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939 class.

The natural spruce forest of the *Quercu-Piceetum* association...

**Key words:** introduced plants, *Picea abies* (L.) Karst., *Platanus* L., Transcarpathia

### Анотація

... міжвидових гібридів роду *Platanus* L. ...is *Picea abies* (L.) Karst.

... гібриди роду *Platanus* ... *Picea abies*...

... належить до виду *Platanus acerifolia* (Aiton) Willd. і має статусу...

Угруповання 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 *Robinietaea* Jurko ex Hadač et Sofron 1980 classes are formed...

## Conclusions

... Among these species is *P. acerifolia*.

..., phytocenoses of the *Epilobietea angustifolii* class is...

14. Після списку літературних джерел надається інформація про кожного автора **АНГЛІЙСЬКОЮ МОВОЮ:**

- Перший рядок – **Surname, Name [in Ukrainian: Прізвище Ім'я]** <sup>1</sup>[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](mailto:lukash2011@ukr.net) або [bht.journal.nuchc@gmail](mailto:bht.journal.nuchc@gmail.com) (у листі вказати прізвище автора).

**РЕДАКЦІЯ ЖУРНАЛУ НЕ НЕСЕ ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ ЗА ЗМІСТ СТАТЕЙ ТА МОЖЕ НЕ ПОДІЛЯТИ ДУМКУ АВТОРА!**

*Апеляції та оскарження*

У разі незгоди з редакційним рішенням автори мають право подати апеляцію. Для цього необхідно надіслати письмове обґрунтування головному редактору. Апеляція буде розглянута редакційною колегією, і рішення за результатами розгляду є остаточним.



### *Виправлення та відкликання статей*

Якщо в опублікованій статті виявлено суттєві помилки або порушення етики, журнал може:

- **Опублікувати виправлення** (erratum) у разі незначних помилок, які не впливають на основні результати.
- **Відкликати статтю** у випадку серйозних порушень, таких як плагіат або фальсифікація даних.

Процедура відкликання передбачає публікацію відповідного повідомлення та позначення статті як відкликаної у всіх версіях.

### *Стандарти звітності про дослідження*

Автори повинні дотримуватися міжнародно визнаних стандартів звітності, таких як CONSORT ([Consolidated Standards of Reporting Trials](#)) для рандомізованих досліджень, PRISMA ([Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses](#)) для систематичних оглядів та інших, залежно від типу дослідження. Це забезпечить прозорість та відтворюваність результатів.

[\[i\]](#)<sup>1</sup> Вказати внесок відповідного (1 – першого, 2 – другого тощо) автора у публікацію, обравши з переліку: 1) study design, 2) data collection, 3) statistical analysis, 4) manuscript preparation, 5) funds collection.

SCIENTIFIC EDITION

**BHT** 

**Biota. Human. Technology**

International Scientific Journal

**BHT : Biota. Human. Technology** / Національний університет  
«Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка; гол. ред.  
О.В. Лукаш. 2025. №1. 234 с.

Designer – N. Tkachuk

Photo of the title page – created by WordItOut

Editing – O. Lukash, I. Kurmakova, O. Syza, H. Tkaczenko, N. Tkachuk, O. Klimova

Administrator of site – N. Tkachuk

Designer cover – N. Tkachuk

Passed for printing  
26.03.2025 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