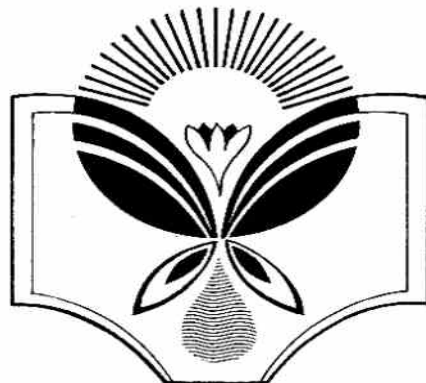




Наукові записки

**Тернопільського національного
педагогічного університету
імені Володимира Гнатюка
Серія: Біологія**

**Scientific Issues
Ternopil Volodymyr Hnatiuk
National Pedagogical University
Series: Biology**



**84 (3-4)
2024**

*Друкується за рішенням вченої ради
Тернопільського національного педагогічного університету
імені Володимира Гнатюка
від 23.12.2024 р. (протокол № 5)*

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Головний редактор:

Н. М. Дробик – д.б.н., проф., Тернопільський національний педагогічний університет ім. Володимира Гнатюка, Україна

Заступники головного редактора:

В. В. Грубінко – д.б.н., проф., Тернопільський національний педагогічний університет ім. Володимира Гнатюка, Україна

О. Б. Столяр – д.б.н., проф., Тернопільський національний педагогічний університет ім. Володимира Гнатюка, Україна

Члени редакційної колегії:

І. В. Азізов – д.б.н., проф., Інститут молекулярної біології і біотехнології Національної академії наук Азербайджану, Баку; **О. І. Боднар** – д.б.н., проф., Тернопільський національний педагогічний університет ім. Володимира Гнатюка, Україна; **В. І. Бумейстер** – д.б.н., проф., Сумський державний університет, Україна; **С. Н. Вадзюк** – д.мед.н., проф., Тернопільський національний медичний університет ім. І. Я. Горбачевського, Україна; **А. І. Герц** – к.б.н., доцент, Тернопільський національний педагогічний університет ім. Володимира Гнатюка, Україна; **Н. В. Герц** – к.б.н., доцент, Тернопільський національний педагогічний університет ім. Володимира Гнатюка, Україна; **Г. М. Голіней** – к.с.-г.н., доцент, Тернопільський національний педагогічний університет ім. Володимира Гнатюка, Україна (*відповідальний секретар*); **Л. Р. Грицак** – д.б.н., проф., Тернопільський національний педагогічний університет ім. Володимира Гнатюка, Україна; **П. Жимскі** – д.мед.н. (біологія), доцент, Познанський медичний університет, Польща; **І. Я. Капрусь** – д.б.н., проф., Державний природознавчий музей НАН України, Львів; **В. З. Курант** – д.б.н., проф., Тернопільський національний педагогічний університет ім. Володимира Гнатюка, Україна; **В. Г. Кур'ята** – д.б.н., проф., Вінницький державний педагогічний університет ім. М. Коцюбинського, Україна; **О. В. Лукаш** – д.б.н., проф., Національний університет «Чернігівський колегіум» ім. Т. Г. Шевченка, Україна; **Н. В. Пасечко** – д.мед.н., проф., Тернопільський національний медичний університет ім. І. Я. Горбачевського, Україна; **С. В. Пида** – д.с.-г.н., проф., Тернопільський національний педагогічний університет ім. Володимира Гнатюка, Україна; **О. С. Покотило** – д.б.н., проф., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна; **С. В. Поливаний** – к.б.н., доцент, Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського, Україна; **Г. Федак** – д.б.н., проф., Оттавський науково-дослідний центр розвитку сільського господарства та агропродуктів, Канада; **М. М. Федоряк** – д.б.н., проф., Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Україна; **В. О. Хоменчук** – к.б.н., доцент, Тернопільський національний педагогічний університет ім. Володимира Гнатюка, Україна

Коректори: О. С. Вербовецька
Т. І. Белей
Комп'ютерна верстка: О. Б. Мацюк

Адреса редакції:
*Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка
вул. Максима Кривоноса, 2
м. Тернопіль, 46027
E-mail: journal@chem-bio.com.ua
http://journals.chem-bio.com.ua*

Збірник включено до Переліку фахових видань України
(категорія "Б", наказ МОН України від 2.07.2020 року № 886).

Свідоцтво про держреєстрацію: КВ № 15884-4356Р від 27.10.2009.

UDC 57(062.552)

H 34

Scientific Issues of Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University.
Series: Biology. 2024. T. 84, № 3–4. 104 p.

*Published by the decision of the Academic Council
of Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University
from 23.12.2024 (protocol № 5)*

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief

N. M. Drobyk – Dr. Sci. in Biol., Prof., Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine

Deputy editors

V. V. Hrubinko – Dr. Sci. in Biol., Prof., Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine

O. B. Stoliar – Dr. Sci. in Biol., Prof., Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine

Editorial board

I. V. Azizov – Dr. Sci. in Biol., Prof., Institute of Molecular Biology and Biotechnologies of Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku; **O. I. Bodnar** – Dr. Sci. in Biol., Prof., Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine; **V. I. Bumeister** – Dr. Sci. in Biol., Prof., Sumy State University, Ukraine; **G. Fedak** – PhD. Philosophy, Prof., Ottawa Research and Development Centre for Agriculture and Agri-Food, Canada; **M. M. Fedoriak** – Dr. Sci. in Biol., Prof., Chernivtsi Yurii Fedkovych National University, Ukraine; **A. I. Herts** – PhD. in Biol., Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine; **N. V. Herts** – PhD. in Biol., Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine; **H. M. Holinei** – PhD. in Agr., Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine (*Responsible secretary*); **L. R. Hrytsak** - Dr. Sci. in Biol., Prof., Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine; **I. J. Kaprus** – Dr. Sci. in Biol., Prof., National Museum of Natural History of NAS of Ukraine Lviv; **V. O. Khomenchuk** – PhD. in Biol., Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine; **V. Z. Kurant** – Dr. Sci. in Biol., Prof., Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine; **V. G. Kuryata** – Dr. Sci. in Biol., Prof., Vinnytsia Mykhailo Kotsiubynskyi State Pedagogical University, Ukraine; **O. V. Lukash** – Dr. Sci. in Biol., Prof., National Taras Shevchenko University “Chernihiv Collegium”, Ukraine; **N. V. Pasyechko** – Dr. Sci. in Med., Prof., I. Horbachevsky Ternopil National Medical University, Ukraine; **O. S. Pokotylo** – Dr. Sci. in Biol., Prof., Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine; **S. V. Polyvani** – PhD. in Biol., Vinnytsia Mykhailo Kotsiubynskyi State Pedagogical University, Ukraine; **S. V. Pyda** – Dr. Sci. in Agr., Prof., Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine; **P. Rzymiski** – Dr. Sci. in Biol., Prof., Poznan University of Medical Sciences, Poland; **S. N. Vadzyuk** – Dr. Sci. in Med., Prof., I. Horbachevsky Ternopil National Medical University, Ukraine

Proofreader:

O. S. Verbovetska

T. I. Belei

Computer editing:

O. B. Matsiuk

Editorial office address:

Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University

2 M. Kryvonosa Str. Ternopil,

46027 Ukraine

E-mail: journal@chem-bio.com.ua

http://journals.chem-bio.com.ua

The journal is included in the list of Research Works of Ukraine
(category B, order of ministry of education and science of Ukraine, July 2, 2020 № 886).

Certificate KB № 15884-4356P, October 27, 2009.

Ukrainian and Latin plant and animal terms are cited according to the author's version

Responsibility for the information and views set out in these publications lies entirely with the authors.

© Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University

ЗМІСТ

БОТАНІКА

- Н. В. ГЕРЦ, А. І. ГЕРЦ, Л. С. БАРНА
ВИВЧЕННЯ АНАТОМІЧНОЇ БУДОВИ ЛИСТКІВ *MISCANTHUS* × *GIGANTEUS*
J.M.GREEF & DEUTER EX HODKINSON & RENVOIZE ЗАСОБАМИ
СВІТЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ *OPENFLEXURE MICROSCOPE* 6

БІОХІМІЯ

- Н. О. ВОВЧЕК
ВПЛИВ СУБЛЕТАЛЬНИХ КОНЦЕНТРАЦІЙ ІОНІВ КОБАЛЬТУ (II)
НА ГЕМАТОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ В ОРГАНІЗМІ ПРІСНОВОДНИХ РИБ 16
- КНМЕЛІАР ІНЕСА, КУШНІР ЛЕСІА, ВОЛОДУМІР ТКАЧ
STUDY OF SUCRALOSE CONTENT IN CARBONATED DRINKS
OF DIFFERENT MANUFACTURES 21
- К. YUNKO, V. MARTYNIUK, V. KHOMA, L. GNATYSHYNA, O. MYKHALYUK,
V. BARANOVSKIИ, M. GLADIUK, H. TULAIДAN, A. MUDRA, *O. STOLIAR
VULNERABILITY OF FRESHWATER MUSSEL *UNIO TUMIDUS*
TO WATERBORNE MIXTURE OF PSYCHOACTIVE SUBSTANCES
AND MICROPLASTIC 29

ГІДРОБІОЛОГІЯ

- В. І. ЩЕРБАК, Н. Є. СЕМЕНЮК, О. А. ДАВИДОВ, Е. Ш. КОЗІЙЧУК
ДОМІНУЮЧІ КОМПЛЕКСИ ВИДІВ У МЕТАУГРУПОВАННЯХ ВОДОРОСТЕЙ
ПЛАНКТОНУ, БЕНТОСУ, ПЕРИФІТОНУ 35

ЕКОЛОГІЯ

- О. І. ГОРИН, М. М. ГЛАДЧУК, О. І. БОДНАР
ЕКОТОКСИКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ВПЛИВУ РЕАЛЬНИХ КОНЦЕНТРАЦІЙ
МЕТАЛІВ МІЛІТАРНОГО ПОХОДЖЕННЯ НА ВОДНІ ОРГАНІЗМИ 46
- Л. Р. ГРИЦАК, В. Г. КИЯК, Д. А. БОЙКО, Н. М. ДРОБИК
ТРАНСФОРМАЦІЯ ПЕРВИННИХ СТРАТЕГІЙ ВИДІВ РОДУ *GENTIANA* L.
У ВИСОКОГІРНИХ ЦЕНОЗАХ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ 55

ФІЗІОЛОГІЯ РОСЛИН

- І. В. ЧЕРНІК
ПАРАМЕТРИ ВОДООБМІНУ ЛИСТКІВ НУТУ ЗВИЧАЙНОГО
(*CICER ARIETINUM* L.) ЗА ВПЛИВУ МІКРОБНИХ ПРЕПАРАТІВ 68

ОГЛЯДИ

- С. В. ПИДА, Н. М. ДРОБИК, Р. Л. ЯВОРІВСЬКИЙ, Н. В. ГЕРЦ, Л. С. БАРНА,
О. Б. МАЦЮК, П. В. ХУДИК, О. Я. БУЧКОВСЬКА
БІБЛІЙНИЙ БОТАНІЧНИЙ САД ТЕРНОПІЛЬСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
ПЕДАГОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ГНАТЮКА :
ЗАПОЧАТКУВАННЯ ТА РОЗВИТОК 76
- О. В. СОРОКА, М. З. ПРОКОП'ЯК, Л. Р. ГРИЦАК, Н. М. ДРОБИК
БІОЛОГІЧНО АКТИВНІ РЕЧОВИНИ ВИДІВ РОДУ *CARLINA* L.
ФЛОРИ УКРАЇНИ 89

ІСТОРІЯ НАУКИ. ПЕРСОНАЛІЇ

- Т. В. МАМЧУР, М. І. ПАРУБОК, М. М. ФІТКАЛЕНКО
ПАМ'ЯТІ УМАНСЬКОГО БОТАНІКА ВАКАР ТЕТЯНИ БОРИСІВНИ
(01.11.1943–10.05.2010) 100

CONTENTS

BOTANY

- N. V. HERTS, A. I. HERTS, L. S. BARNA
STUDY OF THE ANATOMICAL STRUCTURE OF *MISCANTHUS* × *GIGANTEUS*
J.M.GREEF & DEUTER EX HODKINSON & RENVOIZE LEAVES USING THE
OPENFLEXURE MICROSCOPE..... 6

BIOCHEMISTRY

- N. O. VOVCHEK
INFLUENCE OF SUBLETAL CONCENTRATIONS OF COBALT (II) IONS ON
HEMATOLOGICAL INDICATORS IN THE ORGANISM OF FRESHWATER FISH.... 16
- KHMELIAR INESA, KUSHNIR LESIA, VOLODYMYR TKACH
STUDY OF SUCRALOSE CONTENT IN CARBONATED DRINKS
OF DIFFERENT MANUFACTURES..... 21
- K. YUNKO, V. MARTYNIUK, V. KHOMA, L. GNATYSHYNA, O. MYKHALYUK,
V. BARANOVSKII, M. GLADIUK, H. TUL AidAN, A. MUDRA, *O. STOLIAR
VULNERABILITY OF FRESHWATER MUSSEL *UNIO TUMIDUS*
TO WATERBORNE MIXTURE OF PSYCHOACTIVE SUBSTANCES
AND MICROPLASTIC 29

HYDROBIOLOGY

- V. I. SHCHERBAK, N. Ye. SEMENIUK, O. A. DAVYDOV, E. Sh. KOZIYCHUK
DOMINANT SPECIES COMPLEXES IN PLANKTONIC, BENTHIC
AND PERIPHYTIC ALGAL METACOMMUNITIES 35

ECOLOGY

- O. I. HORYN, M. M. HLADCHUK, O. I. BODNAR
ECOTOXICOLOGICAL ASSESSMENT OF THE IMPACT OF REAL
CONCENTRATIONS OF METALS OF MILITARY ORIGIN
ON AQUATIC ORGANISMS..... 46
- L. R. HRYTSAK, V. G. KYIAK, D. A. BOYKO, N. M. DROBYK
TRANSFORMATION OF PRIMARY STRATEGIES OF SPECIES OF THE GENUS
GENTIANA L. IN HIGHLAND CENOSES OF THE UKRAINIAN CARPATHIANS 55

PLANT PHYSIOLOGY

- I. V. CHERNIK
PARAMETERS OF WATER EXCHANGE IN LEAVES OF CHICKPEA (*CICER*
ARIETINUM L.) UNDER THE INFLUENCE OF MICROBIAL PREPARATIONS 68

REVIEWS

- S. V. PYDA, N. M. DROBYK, R. L. YAVORIVSKYI, N. V. HERTS, L. S. BARNA,
O. B. MATSYUK, P. V. KHUDYK, O. Ya. BUCHKOVSKA
BIBLICAL BOTANICAL GARDEN OF TERNOPIL VOLODYMYR HNATIUK
NATIONAL PEDAGOGICAL UNIVERSITY: FOUNDATION AND DEVELOPMENT 76
- O. V. SOROKA, M. Z. PROKOPIAK, L. R. HRYTSAK, N. M. DROBYK
BIOLOGICALLY ACTIVE COMPOUNDS IN SPECIES OF *CARLINA* L. GENUS
OF FLORA OF UKRAINE..... 89

HISTORY OF SCIENCE. OUTSTANDING PEOPLE

- T. V. MAMCHUR, M. I. PARUBOK, M. M. FITKALENKO
IN MEMORY OF UMAN BOTANIST VAKAR TETYANA BORYSIVNA
(01.11.1943–10.05.2010) 100

БОТАНІКА

УДК: 581.4:582.542.1+535.822

doi: 10.25128/2078-2357.24.3–4.1

Н. В. ГЕРЦ, А. І. ГЕРЦ, Л. С. БАРНА

Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка
вул. М. Кривоноса, 2, Тернопіль, 46027
e-mail: herts_nv@chem-bio.com.ua

ВИВЧЕННЯ АНАТОМІЧНОЇ БУДОВИ ЛИСТКІВ *MISCANTHUS* × *GIGANTEUS* J.M.GREEF & DEUTER EX HODKINSON & RENVOIZE ЗАСОБАМИ СВІТЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ *OPENFLEXURE MICROSCOPE*

Показано можливість дослідження та аналізу анатомічної будови листків *Miscanthus* × *giganteus* (міскантус гігантський) з використанням світлової мікроскопії за допомогою пристрою Openflexure Microscope. Вивчення міскантуса є важливим для розуміння морфологічних та фізіологічних особливостей цієї культури, які впливають на продуктивність та адаптацію до різних умов вирощування. Використання Openflexure Microscope дозволяє отримати високу роздільну здатність зображень і здійснити детальне дослідження клітинних структур листка, таких як епідерміс, мезофіл, жилки та їх взаємозв'язки. У статті наведено особливості анатомічної будови листків, що можуть мати важливе значення для подальших селекційних робіт та агрономічних досліджень. Наведено переваги використання Openflexure Microscope в ботанічних дослідженнях, зокрема для аналізу анатомічної будови рослин. Методика використання згаданого пристрою дозволяє детально вивчати як мікроскопічні, так і макроскопічні характеристики листків. Визначено, що особливості будови листків *M. × giganteus* відображають їх адаптацію до різних кліматичних умов і можуть впливати на стійкість рослин до стресових факторів. Зроблено висновки про важливість вивчення анатомії листків *M. × giganteus* із застосуванням Openflexure Microscope для покращення розуміння механізмів росту та розвитку цієї культури.

Ключові слова: *Miscanthus* × *giganteus*, світлова мікроскопія, анатомія листків, буліформні клітини, крапц-анатомія, адаптація, Openflexure Microscope.

Сучасні виклики в енергетиці та екології вимагають розробки інноваційних підходів для забезпечення стійкого розвитку економіки, суспільства та довкілля. Одним із потенційно успішних рішень є вирощування енергетичних культур, таких як *M. × giganteus*, що поєднує високу продуктивність біомаси із здатністю до очищення забруднених ґрунтів. Завдяки своїм властивостям, ця рослина може ефективно рости на маргінальних та забруднених територіях, що підкреслює її значення не лише для біоенергетики, але й для екологічної фіторемедіації [1, 4, 5, 8, 14].

Дослідження анатомічної будови міскантуса є ключовим для розуміння його адаптаційних механізмів до несприятливих умов середовища, таких як посуха, забруднення чи низька родючість ґрунтів. Структура листків, епідерми та продихового апарату відіграє ключову роль у регулюванні фотосинтезу, транспірації та взаємодії рослин із навколишнім середовищем. Дослідження показують, що розподіл та щільність продихів на поверхні листка

суттєво впливають на газообмін та ефективність використання води [9]. Це має вирішальне значення для підвищення продуктивності цієї культури та оптимізації її використання в екологічних проєктах із застосуванням рослин.

Для анатомічного аналізу представників флори надзвичайно важливими є доступні, функціональні та точні інструменти. У цьому контексті OpenFlexure Microscope є відкритим технічним рішенням, що побудоване за ліцензією CERN Open Hardware Licence (CERN-OHL). Ця ліцензія дозволяє вільне використання, модифікацію та розповсюдження апаратного забезпечення, гарантуючи доступність та сприяючи спільноті розробників у всьому світі [16]. Цей портативний світловий мікроскоп з відкритим дизайном дозволяє проводити високоякісні дослідження з мінімальними фінансовими витратами. Завдяки можливості виготовлення за допомогою 3D-друку та інтеграції з цифровими технологіями, OpenFlexure Microscope забезпечує широкий доступ до мікроскопії навіть у лабораторіях із лімітованим бюджетом або у польових умовах [16].

Поєднання біоенергетичного потенціалу міскантуса, його здатності до фітореємедіації та використання інноваційного інструменту для анатомічного аналізу створює багатофункціональну платформу для вирішення глобальних проблем [1, 4, 5, 8, 14]. Аналіз мікроструктур тканин дозволяє оцінити, як ця культура реагує на забруднення та інші стресові умови. Отримані результати можуть сприяти покращенню селекційних програм та розробці ефективних стратегій вирощування міскантуса на екологічно проблемних територіях. Таким чином, дослідження анатомічної будови *M. × giganteus* із застосуванням OpenFlexure Microscope є важливим кроком до оптимізації його використання як енергетичної культури та інструменту фітоочиснення. Це підхід, що поєднує економічну вигоду, екологічну стійкість та наукову інноваційність, сприяє вирішенню енергетичних і екологічних проблем сучасності.

Матеріали та методи досліджень

Для дослідження анатомічної будови листків *M. × giganteus* було використано стандартні методи анатомічного аналізу із застосуванням світлової мікроскопії OpenFlexure Microscope (рис. 1). Дослідження проводили у кілька етапів. Листки міскантуса були зібрані у фазу активного росту з середньої частини рослини для забезпечення репрезентативності даних. Поперечні зрізи листків товщиною 15–20 мікрометрів виготовляли за допомогою санного мікротома MC-2. Отримані зрізи переносили на предметне скло та занурювали у гліцерин для забезпечення тривалої прозорості та збереження структури тканин. Для запобігання висихання зразка краї покривного скла фіксували прозорим манікюрним лаком. Відбитки верхньої та нижньої епідерми виконували методом Молотковського-Полаччі [3].

OpenFlexure Microscope забезпечив якісну візуалізацію анатомічних мікроструктур тканин листка (об'єктив SIGETA Semi-Plan 60x/0.65), таких як епідермальні клітини, провідні пучки та хлоренхіма. Зображення отримували за допомогою інтегрованої камери мікроскопа (Raspberry Pi Camera Module V2), після чого проводили їх аналіз із використанням спеціалізованого програмного забезпечення OpenFlexure Connect [16].

Результати досліджень та їх обговорення

Наразі відсутні дані про дослідження анатомічної будови міскантуса із застосуванням методів світлової мікроскопії OpenFlexure в Україні. OpenFlexure Microscope широко застосовується у світі для біологічних досліджень, особливо, коли важлива невисока вартість обладнання. Його використовують для вивчення рослинних тканин, клітинної структури та мікроорганізмів [16]. В Україні дослідження міскантуса здебільшого виконують за допомогою класичних методів. Залучення OpenFlexure Microscope могло б значно розширити можливості аналізу особливостей анатомії рослинних організмів. Це також сприяло б підвищенню доступності сучасних дослідницьких інструментів.

У наукових публікаціях описано його застосування для автоматизованого аналізу в лабораторіях, зокрема для виявлення паразитів у зразках крові [11]. Дослідження демонструють здатність цього мікроскопа до візуалізації інфікованих *Plasmodium* червоних кров'яних клітин і колоїдних частинок у різних режимах освітлення [11]. Інші літературні джерела особливо увагу

приділяють методам автоматичного фокусування, які є ключовими для точного визначення різних видів водоростей, що підтверджує доцільність застосування OpenFlexure Microscope [10].



Рис. 1. Загальний вигляд OpenFlexure Microscope [16].

Актуальність дослідження анатомії міскантуса за допомогою OpenFlexure Microscope зумовлена потребою в доступних і точних методах аналізу рослинних структур. На сьогодні *M. × giganteus* в Україні та світі є ефективною енергетичною культурою, яка, завдяки своїй високій урожайності та швидкому росту, є сировиною для виробництва біопалива, що вимагає детального вивчення механізмів її культивування. Біомасу міскантуса можна використовувати для створення біоетанолу, біодизеля, а також для виробництва твердого біопалива, такого як гранули та брикети. Це забезпечує екологічно чисте джерело енергії, що може стати гідною альтернативою викопним видам палива [2, 5]. Також міскантус гігантський може бути використаний як високопоживна кормова культура для тваринництва. Рослина містить до 25 % протеїну та значний вміст клітковини, що робить її корисною для забезпечення тварин необхідними поживними речовинами. Крім того, міскантус стійкий до посухи й хвороб, що мінімізує витрати на догляд і забезпечує стабільну продуктивність навіть у складних кліматичних умовах, тому є економічно вигідним для фермерських господарств [5].

Отже, *M. × giganteus* – універсальна культура, яка має величезний потенціал для вирішення ряду екологічних, економічних та енергетичних завдань. Використання цієї рослини не лише знижує навантаження на екосистеми, а й створює нові можливості для сталого розвитку сільського господарства та енергетики. Впровадження міскантуса в аграрний сектор може стати важливим кроком до екологічної безпеки, енергетичної незалежності та підтримки біорізноманіття.

Міскантус – це однодомна рослина з коротким вегетаційним періодом, яка цвіте з кінця серпня до початку жовтня. Усі види міскантуса є світлолюбними, а їхні листки демонструють анатомо-морфологічну пластичність до умов середовища. Пагони *M. × giganteus* можуть вирости від 1,5 до 5,0 м заввишки [5], причому в дослідних умовах їхня максимальна висота становила 3,9–4,3 м (рис. 2). Рослини характеризуються безперервним ростом протягом життєвого циклу, прикореневі листки часто засихають у липні-серпні, тоді як молоді листки мають більшу площу. Розмір листків залежить від віку рослини, густоти насаджень та умов

виросування і в середньому становить 120–140–160 см² із можливими варіаціями залежно від екологічних факторів.



Рис. 2. Міскантус гігантський (*Miscanthus × giganteus*).

Кожен пагін міскантуса несе від 16 до 20 лінійних листків, розташованих спіралью (почергово) на стеблі. Листки мають зазубрені краї, паралельне жилкування, а їхні кінчики звужуються, утворюючи волосоподібний відросток. Довжина становить у середньому 0,5–1,0 м, а ширина – 1,0–2,1 см. Вони залишаються на рослині тривалий час, причому верхні можуть зберігатися до середини зими. Листова пластинка *M. × giganteus* має ланцетоподібну форму, вузьку витягнуту структуру та ізолатеральну будову, при якій мезофіл однаковий під верхньою та нижньою епідермою. Така структура сприяє симетричному розподілу тканин і оптимальному куту нахилу листків, забезпечуючи рівномірне освітлення обох боків.

Використання OpenFlexure Microscope дало можливість проаналізувати конструктивні характеристики епідерми та продихів *M. × giganteus*. Встановлено, що продихи у досліджених особин мають специфічні анатомо-фізіологічні характеристики, які дозволяють рослині адаптуватися до різноманітних стресових умов середовища зростання. Продихи розташовані на обох поверхнях листка (амфістоматичний тип), проте більша їх кількість знаходиться на нижній поверхні, оточена специфічними допоміжними клітинами. Продиховий апарат у листках має парацитний тип, де поздовжні стінки сусідніх клітин орієнтовані паралельно до продихової щілини. Така структура дозволяє ефективно контролювати відкриття та закриття продихів залежно від змін навколишнього середовища (рис. 3). Щільність продихів змінюється, але загалом вона досить висока: на 1 мм² листка їх кількість варіюється від 180 до 400.

У перспективі це дасть можливість точніше оцінити здатність рослини до регуляції водного балансу та фотосинтетичної активності в умовах стресу, таких як дефіцит вологи чи інтенсивне освітлення.

Епідерма листків міскантуса гігантського, як і в більшості злакових рослин, має ряд характерних рис, які сприяють пристосуванню до змінних умов середовища. Базисні епідермальні клітини живі, щільно зімкнені та мають товсті зовнішні стінки, покриті потужним шаром кутикули. Нашарування кутикули є нерівномірним та утворює специфічний рельєф на поверхні листка. У складі епідерми міскантуса виявлено силікатні клітини (фітоліти), що додають міцності та захищають рослину. Нерівномірність кутикулярного шару та наявність фітолітів спричиняють гребінчастий або сосочкуватий рельєф дорсальної (адаксіальної) епідерми листків міскантуса (рис. 5. Б). Отже, за допомогою OpenFlexure Microscope можна детально візуально оцінити ці клітини та їх взаємодію з іншими структурами.

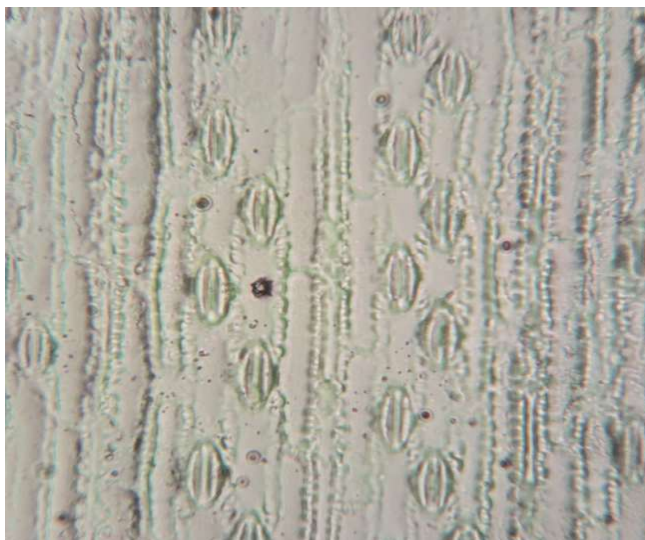


Рис. 3. Продихи на відбитку нижньої епідерми листків *M. x giganteus* (за методом Г. Х. Молотковського-Полаччі).



Рис. 4. Групове розташування буліформних клітин на поперечному перерізі листка *M. x giganteus* (відзначені стрілками) (зб. об'єktiv 60x).

Нами виявлено наявність в епідермі міскантуса буліформних клітин [13, 15]. Це великі тонкостінні клітини, що розташовані в рядках між звичайними клітинами епідерми (рис. 4). Буліформні клітини (або моторні клітини) у міскантуса гігантського мають низку анатомічних та функціональних особливостей, які відіграють важливу роль у регулюванні водного балансу та адаптації до стресових умов середовища [6].

Буліформні клітини у міскантуса гігантського розташовані групами по 4–5 у верхньому епідермальному шарі листка, вздовж центральної жилки та паралельно основним жилкам (рис. 4), що є особливістю рослини. Залежно від віку листка, його оводненості буліформні клітини можуть рельєфно виступати поміж клітин епідерми або, навпаки, бути на одному з ними рівні у молодих лисках. Вони мають збільшений розмір, порівнюючи з іншими клітинами епідерми, та тонкі стінки, що дозволяє їм змінювати об'єм залежно від водного статусу рослини. Серед 4–5 клітин 2 виділяються найбільшим розміром, інші оточуючі менші (рис. 5, А). Цікавим є

чергування великих груп по 4–5 клітин з групами із 2–3 клітин по всій довжині листка (рис. 4). Найбільші клітини мають округлу або еліптичну форму, з великими вакуолями, які зберігають воду. Згідно з літературними даними, їх цитоплазма менш насичена, що зменшує витрати енергії на підтримку життєдіяльності, але дозволяє швидко реагувати на зміни оводненості [13, 15].



Рис. 5. Відмінність у розмірах буліформних клітин (позначено стрілками) на поперечних перерізах листка *M. x giganteus*: А – великі, об'ємні, оводнені, листок розправлений; Б – меншого об'єму, листок скручений (зб. об'єktiv 60x).

Внутрішні стінки крайніх буліформних клітин контактують із продишовою порожниною. Зовнішні їх сторони, які прилягають до клітин епідермісу, є звуженими і розширені у зоні контакту із мезофілом. Це часто обумовлює їх грушоподібну форму. Довга вісь центральної буліформної клітини має в середньому 100 ± 11 мкм, а коротка (на внутрішньому полюсі, що прилягає до мезофілу) має розміри 70 ± 8 мкм. Довга вісь бічних буліформних клітин була меншою, вона становила в середньому 51 ± 7 мкм, коротка вісь – 20 ± 3 мкм відповідно.

Функціональне значення цих клітин полягає у механізмі згортання листка: за достатньої кількості води клітини наповнюються, листок залишається розправленим, що максимізує фотосинтетичну активність. А за дефіциту води буліформні клітини втрачають тургор, листок скручується вздовж центральної жилки, що зменшує випаровування (рис. 5, Б) [13, 15]. Завдяки цьому механізму міскантус гігантський ефективно економить воду в умовах нестачі вологи.

Буліформні клітини сприяють адаптації до середовища з високими температурами та низькою вологістю, що є важливим для вирощування міскантуса в регіонах з ризиком посухи. У рослин, які вирощують у сприятливих умовах, розмір та кількість буліформних клітин можуть бути меншими, оскільки механізм згортання листка активується рідше. Кількість таких буліформних клітин є однією з діагностичних ознак для рослин родини *Poaceae*, що узгоджується з літературними даними [13, 15]. Дослідження буліформних клітин дозволяє оцінити посухостійкість *M. x giganteus* і сприяти селекції рослин, які можна вирощувати у несприятливих кліматичних умовах.

Епідерма міскантуса є одношаровою, з тонкостінними клітинами, ефективно пропускає світло до мезофілу листка, що важливо для процесів С4-фотосинтезу, характерного для цієї рослини [13].

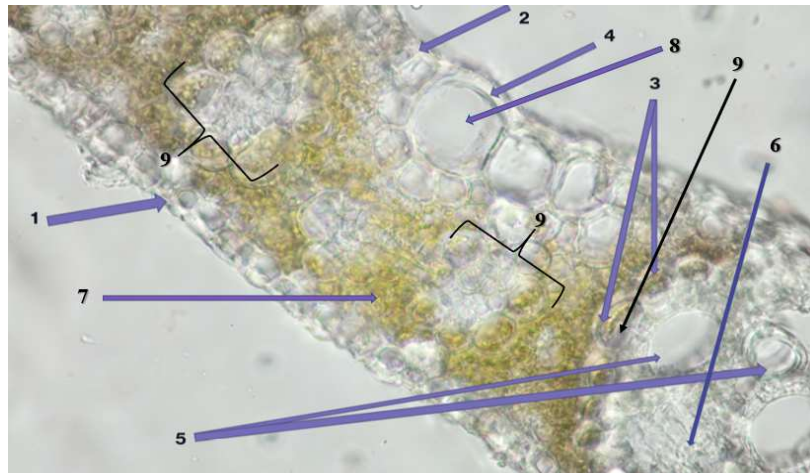


Рис. 6. Поперечний переріз листка *Miscanthus x giganteus*: 1 – нижня епідерма; 2 – верхня епідерма; 3 – клітини обкладки з відцентровим розташуванням хлоропластів; 4 – кутикула; 5 – ксилема; 6 – флоема; 7 – хлоренхіма; 8 – буліформна клітина; 9 – кранц-клітини обкладки провідного пучка.

Для глибокого розуміння адаптивних механізмів цього виду необхідно звернути увагу на внутрішню будову листка. За допомогою OpenFlexure Microscope ми можемо досліджувати тканини, що знаходяться під епідермою, зокрема мезофіл, у якому відбуваються процеси фотосинтезу (рис. 6). Використання цього мікроскопа дозволяє детально аналізувати організацію клітин хлоренхіми, а також їх взаємозв'язок з епідермою. У *M. x giganteus* клітини хлоренхіми, які оточують провідні пучки, мають більші розміри, на відміну від інших клітин мезофілу, і містять більш помітні хлоропласти (рис. 6). Ці клітини утворюють навколо кожного пучка своєрідну фотосинтезуючу обкладку, яка на поперечному зрізі нагадує квітку з зеленими пелюстками або корону (вони отримали назву «кранц-клітини» від німецького «Kranz» – корона, вінок). Інші клітини мезофілу листка у міскантуса прозорі, або є певна кількість забарвлених клітин з невеликими хлоропластами звичної форми, невеликих розмірів. Цей тип анатомічної будови листка злаків отримав назву «панікоїдний» (від *Panicum*). Назва «кранц-клітини» дана клітинам обкладки провідних пучків Хаберландтом (Haberlandt) у 1884 році під час вивчення анатомічної будови окремих представників родини *Cyperaceae* [7, 12, 13, 15]. Самі клітини обкладки провідного пучка є великі, щільно упаковані клітини розташовані кільцем навколо судинно-волоконистих пучків. Кількість обгорткових клітин залежить від величини провідного пучка і становила у досліджених особин від 10 до 17 одиниць. Форма таких клітин округла, злегка овальна. У них спостерігався високий вміст хлоропластів, які адаптовані для роботи в умовах низького рівня кисню. Стінки клітин мають суберинове ущільнення, що зменшує дифузію газів. Кільце клітин обкладки пучка добре помітне при мікроскопічному дослідженні поперечного зрізу листка. У зрізах видно чіткий поділ між двома типами клітин (рис. 5).

Особливість розташування клітин хлоренхіми у злаків з C4 типом фотосинтезу, з одного боку, зменшує ефективність використання сонячних променів. З іншого боку, розташування фотосинтезуючих клітин безпосередньо на провідних пучках істотно зменшує затрати води на транспорт синтезованих речовин. Тому, завдяки зменшенню необхідної транспірації, такі рослини легко витримують посуху і задовольняються для росту невеликою кількістю води [7, 12, 13]. Клітини мезофілу листка міскантуса рівномірно розташовані між клітинами обкладки пучка і епідермою (рис. 5). Згідно літературних даних, завдяки кранц-анатомії в міскантуса гігантського знижуються втрати CO₂ через фотодихання, підвищується ефективність використання води [12]. Рослина демонструє високу продуктивність навіть за несприятливих кліматичних умов. Встановлено, що на поперечних перерізах листків міскантуса розташування хлоропластів є своєрідним, вони займають відцентрове положення у клітинах обкладки провідного пучка, тобто на максимальному віддаленні від провідного пучка та ближче до мезофілу (рис. 6).

Висновки

Отже, міскантус гігантський демонструє здатність до адаптації на рівні анатомо-морфологічної будови листків, що робить цю рослину перспективною для вирощування в умовах зміни клімату та подальшого використання в біоенергетиці.

OpenFlexure Microscope дозволяє проводити якісний аналіз анатомічних структур листків міскантуса гігантського: епідермальні структури, продиховий апарат, кутикулярний шар, а також внутрішні тканини рослини, зокрема мезофіл.

Залучення OpenFlexure Microscope до досліджень в Україні може значно розширити можливості локальної науки, підвищити доступність сучасних інструментів для аналізу рослин і забезпечити отримання якісних даних для подальших біологічних досліджень. Завдяки відкритому апаратному забезпеченню, низькій вартості виробництва та широкому спектру застосувань цей мікроскоп може стати доступним інструментом для розвитку наукових ініціатив в Україні, особливо в умовах недостатнього фінансування.

1. Герц А. І., Конончук О. Б., Герц Н. В., Підліснюк В. В., Хоменчук В. О., Пида С. В. Активність фотосинтетичного апарату *Miscanthus × giganteus* за умов забруднення ґрунту дизельним паливом і внесення біочару. *Фізіологія рослин і генетика*. 2022. Т. 54, № 2. С. 161–176. doi: <https://doi.org/10.15407/frg2022.02.161>.
2. Гументик М. Я., Гайда Ю. І., Фучило Я. Д., Гнап І. В. Економічна ефективність інвестицій у вирощування біоенергетичних культур в зоні Лісостепу України. *Економічний аналіз*. 2018. Т. 28, № 2. С. 21–29.
3. Ковалишин І. Б., Ліханов А. Ф., Пінчук А. П., Вахновська Н. Г. Епідерма листків дрібноквіткових представників роду *Clematis* L. *Лісове і садово-паркове господарство*. 2016. № 9. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/licgoc_2016_9_6.
4. Марченко В. Енергетичні культури в Україні. *Agroexpert*. 2012. № 9. С. 114–117.
5. Міскантус в Україні: монографія / Роїк М. В. та ін. Київ : ФОП Ямчинський О. В., 2019. 256 с.
6. Моргун І. А. Біологічні особливості рослин міскантуса за умов оптимального зволоження. *Новітні технології вирощування сільськогосподарських культур: тези доповідей 5 Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених (м. Київ, 29–30 вересня 2016 р.)*. Вінниця, Нілан-ЛТД. 2016. С. 111.
7. Briske D. D. Developmental Morphology and Physiology of Grasses. *Grazing Management: An Ecological Perspective*. Portland: Timber Press; 1991. pp. 85–108.
8. Barbosa B., Boléo S., Sidella S, Costa J., Duarte M. P., Mendes B., Salvatore L. Cosentino & A. L. Fernando Phytoremediation of Heavy Metal-Contaminated Soils Using the Perennial Energy Crops *Miscanthus* spp. and *Arundo donax* L. *Bioenergy Res.* 2015; Vol. 8, P.1500–1511. doi:10.1007/s12155-015-9688-9.
9. Foster J. R., Smith W. K. Influence of stomatal distribution on transpiration in low-wind environments. *Plant Cell Environ.* 1986; Vol. 9: P. 751–759. doi:10.1111/j.1365-3040.1986.tb02108.x.
10. Grant S. D., Richford K., Burdett H. L., McKee D., Patton B. R. Low-cost, open-access quantitative phase imaging of algal cells using the transport of intensity equation. *R Soc Open Sci.* 2020;7: 191921. doi:10.1098/rsos.191921.
11. Knapper J., Collins J. T., Stirling J., McDermott S., Wadsworth W., Bowman R. Fast, high precision autofocus on a motorised microscope: automating blood sample imaging on the OpenFlexure Microscope. arXiv [physics.ins-det]. 2021. doi:10.48550/ARXIV.2109.06842.
12. Lundgren M. R., Osborne C. P., Christin P-A. Deconstructing Kranz anatomy to understand C4 evolution. *J Exp Bot.* 2014;65: 3357–3369. doi:10.1093/jxb/eru186.
13. Nedukha O. Effects of moderate drought on leaf bulliform cells of aquatic and coastal population of *Phragmites australis*. *Turk J Botany.* 2022;46: 459–472. doi:10.55730/1300-008x.2722.
14. Nurzhanova A., Pidlisnyuk V., Abit K., Nurzhanov C., Kenessov B., Stefanovska T., et al. Comparative assessment of using *Miscanthus × giganteus* for remediation of soils contaminated by heavy metals: a case of military and mining sites. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2019; Vol. 26: P. 13320–13333. doi:10.1007/s11356-019-04707-z.
15. Pauková Ž., Jureková Z. Stomatal density in *Miscanthus* leaves. *Acta Horti Regiotect.* 2015; Vol. 18: Pp. 45–48. doi:10.1515/ahr-2015-0009.
16. Open Flexure microscope. URL: <https://openflexure.org/projects/microscope/> (дата звернення: 26.01.2025).

References

1. Herts A. I., Kononchuk O. B., Herts N. V., Pidlisniuk V. V., Khomenchuk V. O., Pyda S. V. Aktyvnist fotosyntetychnoho aparatu *Miscanthus × giganteus* za umov zabrudnennia igruntu dyzelnym palnym i vnesennia biocharu. *Fiziolohiia roslyn i henetyka*. 2022. T. 54, No 2. S. 161–176. doi: <https://doi.org/10.15407/frg2022.02.161>. [in Ukrainian]
2. Humentyk M. Ya., Hayda Yu. I., Fuchylo Ya. D., Hnap I. V. Ekonomichna efektyvnist investytsii u vyroshchuvannia bioenerhetychnykh kultur v zoni Lisostepu Ukrainy. *Ekonomichnyy analiz*. 2018. T. 28, No 2. S. 21–29. [in Ukrainian]
3. Kovalyshyn I. B., Likhanov A. F., Pinchuk A. P., Vakhnovska N. H. Epiderma lystkiv dribnokvitkovykh predstavnykiv rodu *Clematis* L. *Lisove i sadovo-parkove hospodarstvo*. 2016. No 9. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/licgoc_2016_9_6. [in Ukrainian]
4. Marchenko V. Enerhetychni kultury v Ukraini. *Agroexpert*. 2012. No 9. S. 114–117. [in Ukrainian]
5. Miskantus v Ukraini: monohrafiia / Roik M. V. ta in. Kyiv : FOP Yamchynskiy O. V., 2019. 256 s. [in Ukrainian]
6. Morhun I. A. Biolohichni osoblyvosti roslyn miskantusa za umov optimal'noho zvolozhennia. Novitni tekhnolohii vyroshchuvannia sil'skohospodars'kykh kul'tur: tezy dopovidey 5 Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii molodykh vchenykh (m. Kyiv, 29–30 veresnia 2016 r.). Vinnytsia, Nilan-LTD. 2016. S. 111. [in Ukrainian]
7. Briske D. D. Developmental Morphology and Physiology of Grasses. Grazing Management: An Ecological Perspective. Portland: Timber Press; 1991. pp. 85–108.
8. Barbosa B., Boléo S., Sidella S, Costa J., Duarte M. P., Mendes B., Salvatore L. Cosentino & A. L. Fernando Phytoremediation of Heavy Metal-Contaminated Soils Using the Perennial Energy Crops *Miscanthus* spp. and *Arundo donax* L. *Bioenergy Res*. 2015; Vol. 8, P.1500–1511. doi:10.1007/s12155-015-9688-9.
9. Foster J. R., Smith W. K. Influence of stomatal distribution on transpiration in low-wind environments. *Plant Cell Environ*. 1986; Vol. 9: P. 751–759. doi:10.1111/j.1365-3040.1986.tb02108.x.
10. Grant S. D., Richford K., Burdett H. L., McKee D., Patton B. R. Low-cost, open-access quantitative phase imaging of algal cells using the transport of intensity equation. *R Soc Open Sci*. 2020;7: 191921. doi:10.1098/rsos.191921.
11. Knapper J., Collins J. T., Stirling J., McDermott S., Wadsworth W., Bowman R. Fast, high precision autofocus on a motorised microscope: automating blood sample imaging on the OpenFlexure Microscope. arXiv [physics.ins-det]. 2021. doi:10.48550/ARXIV.2109.06842.
12. Lundgren M. R., Osborne C. P., Christin P-A. Deconstructing Kranz anatomy to understand C4 evolution. *J Exp Bot*. 2014;65: 3357–3369. doi:10.1093/jxb/eru186.
13. Nedukha O. Effects of moderate drought on leaf bulliform cells of aquatic and coastal population of *Phragmites australis*. *Turk J Botany*. 2022;46: 459–472. doi:10.55730/1300-008x.2722.
14. Nurzhanova A., Pidlisnyuk V., Abit K., Nurzhanov C., Kenessov B., Stefanovska T., et al. Comparative assessment of using *Miscanthus × giganteus* for remediation of soils contaminated by heavy metals: a case of military and mining sites. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2019; Vol. 26: P. 13320–13333. doi:10.1007/s11356-019-04707-z.
15. Pauková Ž., Jureková Z. Stomatal density in *Miscanthus* leaves. *Acta Horti Regiotect*. 2015; Vol. 18: Pp. 45–48. doi:10.1515/ahr-2015-0009.
16. Open Flexure microscope. URL: <https://openflexure.org/projects/microscope/> (дата звернення: 26.01.2025).

N. V. Herts, A. I. Herts, L. S. Barna

Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine

STUDY OF THE ANATOMICAL STRUCTURE OF *MISCANTHUS × GIGANTEUS* J.M.GREEF & DEUTER EX HODKINSON & RENVOIZE LEAVES USING THE OPENFLEXURE MICROSCOPE

This study demonstrates the potential of investigating and analyzing the anatomical structure of *Miscanthus × giganteus* (Giant Miscanthus) leaves using light microscopy with the OpenFlexure Microscope. Research on this crop is crucial for understanding its morphological and physiological characteristics, which influence productivity and adaptation to diverse growing conditions. Key features of leaf structure, including the epidermis, stomatal apparatus, and vascular system, determine the efficiency of photosynthesis, transpiration, and the accumulation of pollutants. These factors are

essential for enhancing the productivity of this crop and optimizing its use in ecological projects, particularly in phytoremediation.

Accessible, functional, and high-precision tools are essential for the anatomical analysis of plants. The OpenFlexure Microscope facilitates high-resolution imaging and detailed examination of cellular structures in leaves, such as the epidermis, mesophyll, and veins, as well as their interactions. With its 3D-printed design and integration with digital imaging technologies, the OpenFlexure Microscope enhances access to microscopy, even in laboratories with limited resources or in field-based studies.

This article presents the anatomical features of *Miscanthus × giganteus* leaves, which are critical for further breeding and agronomic research. The advantages of using the OpenFlexure Microscope in botanical studies are highlighted, particularly in the examination of plants with complex morphological structures. The method allows for a comprehensive analysis of both microscopic and macroscopic leaf characteristics.

The findings indicate that the leaf structure of *Miscanthus × giganteus* is well-adapted to various climatic conditions, contributing to the plant's resilience to stress factors. The study concludes that analyzing leaf anatomy is essential for advancing knowledge of the growth and development mechanisms of this crop. The results could contribute to the improvement of breeding programs and the development of effective cultivation strategies for *Miscanthus* in environmentally challenging sites.

Thus, the anatomical study of *Miscanthus × giganteus* using the OpenFlexure Microscope represents an important step toward optimizing its use as an energy crop and a phytoremediation tool. This approach combines economic benefits, ecological sustainability, and scientific innovation, addressing contemporary challenges in energy and environmental science. Integrating the OpenFlexure Microscope into research in Ukraine could significantly enhance local scientific capacity, improve the accessibility of modern tools for plant analysis, and provide higher-quality data for bioenergy and agricultural research.

Key words: Miscanthus × giganteus, light microscopy, leaf anatomy, bulliform cells, Kranz anatomy, adaptation, OpenFlexure Microscope.

Надійшла 12.11.2024.

БІОХІМІЯ

УДК 546.732: (597.551.2+597.552.1): 612.1

doi: 10.25128/2078-2357.24.3–4.2

Н. О. ВОВЧЕК

Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка
вул. М. Кривоноса, 2, Тернопіль 46027
e-mail: natvovchek@ukr.net

ВПЛИВ СУБЛЕТАЛЬНИХ КОНЦЕНТРАЦІЙ ІОНІВ КОБАЛЬТУ (II) НА ГЕМАТОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ В ОРГАНІЗМІ ПРІСНОВОДНИХ РИБ

У роботі досліджено зміни окремих біохімічних показників (вміст глюкози, лактату, пірувату, активність лактатдегідрогенази) у крові карася сріблястого (*Carassius gibelio* Bloch.) та щуки звичайної (*Esox lucius* L.) за дії 0,1 та 0,25 мг/дм³ іонів Co²⁺ у воді. Показано, що зміни гематологічних показників крові риб мають видову специфіку та залежать від концентрації іонів металу у водному середовищі. Вміст металу у крові обох видів риб не змінювався за дії сублетальних концентрацій іонів кобальту, проте в карася був на порядок нижчим як у щуки. Встановлено зростання концентрації глюкози в обох видів риб за впливу обох концентрацій кобальту. Концентрація лактату у крові карася зростала за дії 0,1 мг/дм³ та за дії 0,25 мг/дм³ іонів металу – у щуки. Концентрація пірувату у крові карася зростала за 0,25 мг/дм³ іонів Co²⁺ у воді та пропорційно до концентрації іонів металу у воді знижувалася у крові щуки. Відзначено позитивну кореляцію між співвідношенням лактат/піруват та активністю лактатдегідрогенази у крові обох видів риб за дії підвищених концентрацій іонів кобальту. Встановлено, що у щуки за високих концентрацій іонів кобальту у воді (0,25 мг/дм³) зростає роль гліколітичних процесів в енергозабезпеченні організму.

Ключові слова: щука, карась, кров, кобальт.

Забруднення гідроєкосистем важкими металами стало глобальною екологічною проблемою, яка загрожує як гідробіонтам, так і здоров'ю людей. Зростає воно через індустріалізацію, зміну клімату та урбанізацію [4, 9]. Особливо актуальною проблема постала для України після російського вторгнення [1].

Іони важких металів у підвищених концентраціях є токсичними, потенційно канцерогенними та можуть біоакумулюватися в біологічних системах [3]. Серед них розрізняють біогенні (есенціальні) та токсичні (неесенціальні).

Кобальт є важливим біогенним елементом, оскільки входить до складу вітаміну В₁₂ (кобаламіну), який відіграє ключову роль у метаболізмі, бере участь у синтезі ДНК та утворенні червоних кров'яних клітин організму [7].

Як правило, дефіцит В₁₂ призводить до поганого росту, анемії та зменшення споживання корму рибами [5].

Однак кобальт у концентраціях, які перевищують природні фонові рівні, може накопичуватися у тканинах риб та порушувати метаболічні процеси в їх організмі [9].

Для оцінки якості води часто застосовують методи біоіндикації та біотестування, використовуючи риб як чутливий індикатор забруднення [11]. Тому розробка та вдосконалення методів оцінки токсичності водного середовища є актуальним завданням науковців.

Система крові риб відображає реакцію їх організму на дію токсичних чинників [10], проте зміни гематологічних показників можуть бути різноманітними та не завжди специфічними для конкретного виду риб.

Тому метою нашого дослідження було здійснити порівняльну характеристику змін окремих біохімічних показників крові риб (карася та щуки) за дії підвищених концентрацій іонів Co^{2+} у воді.

Матеріали та методи досліджень

Для експериментальних досліджень було використано поширені прісноводні види: риб карась сріблястий (*Carassius gibelio* Bloch.) і щука звичайна (*Esox lucius* L.) середньою масою 200–220 г та 150–170 г відповідно. Вивчали вплив кобальту у двох концентраціях – 2 і 5 ГДК, що в перерахунку на іони становило 0,1 та 0,25 мг/дм³. Метал у вигляді кобальт хлориду додавали у воду акваріумів об'ємом 200 дм³, де знаходилися дослідні групи риб (по п'ять особин у кожному). Воду в акваріумах змінювали щодобово. Аклімацію риб здійснювали протягом 14 діб.

Після зазначеного терміну відбирали кров із серця риб. Для одержання плазми гепаринізовану кров центрифугували 20 хвилин при 3000 об/хв. Визначали концентрацію кобальту, лактату та пірувату у крові, вміст глюкози та активність лактатдегідрогенази (ЛДГ) у плазмі крові риб.

Для визначення вмісту металу проби крові спалювали у нітратній кислоті у співвідношенні 1:5 (об'єм : об'єм). Вміст металу визначали на оптичному спектрометрі з індуктивно-зв'язаною плазмою «iCAP 6300 DUO» (США).

Вміст глюкози у плазмі крові риб визначали за допомогою глюкозооксидазного методу з використанням набору реактивів Глюкоза – 200. Цей метод базується на реакції глюкози з глюкозооксидазою, у результаті чого утворюються глюконова кислота та перекис водню. Перекис водню окиснює хромоген, перетворюючи його на забарвлену сполуку, інтенсивність фарбування якої пропорційна концентрації глюкози в пробі.

Піруват та лактат для визначення екстрагували із крові риб крижаною 6 % хлорною кислотою та після нейтралізації визначали ферментативно з використанням препарату лактатдегідрогенази [2]. Її активність (L-лактат: НАД оксидоредуктаза КФ 1.1.1.27) у плазмі крові риб визначали за швидкістю окиснення НАДН, яку реєстрували за зменшенням величини оптичної густини при 340 нм [12].

Усі дослідження проводили з дотриманням суворих етичних норм, встановлених Європейською конвенцією про гуманне ставлення до лабораторних тварин. Усі одержані дані оброблено статистично з використанням пакету «Microsoft Office Excel».

Результати досліджень та їх обговорення

Аналіз результатів показав, що гематологічні показники крові риб мали видову специфіку. Так, вміст металів у крові обох видів риб практично не змінювався за дії досліджуваних концентрацій іонів кобальту. Водночас слід відзначити, що у карася він був на порядок нижчим як у щуки (рис. 1).

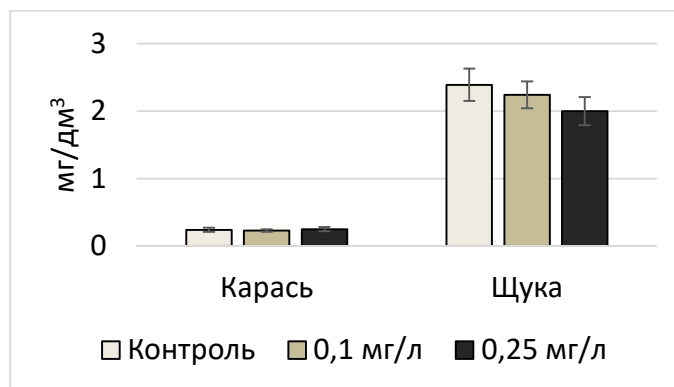


Рис. 1. Вміст кобальту у крові риб за дії сублетальних концентрацій кобальту ($M \pm m$, $n=5$).

Вміст глюкози у крові контрольної групи карасів становив 5,2, а у щуки 4,6 ммоль/дм³ (рис. 2). За впливу 0,1 та 0,25 мг/дм³ іонів кобальту у воді концентрація глюкози у крові риб зростала відповідно в 1,3 та у 1,1 разів у карасів і в 1,2 та 1,4 разів у щуки. Ймовірно, це обумовлено зростанням енерговитрат організму риб для протидії токсичному чиннику. Відомо [8], що підвищення рівня глюкози в крові є ознакою стресу.

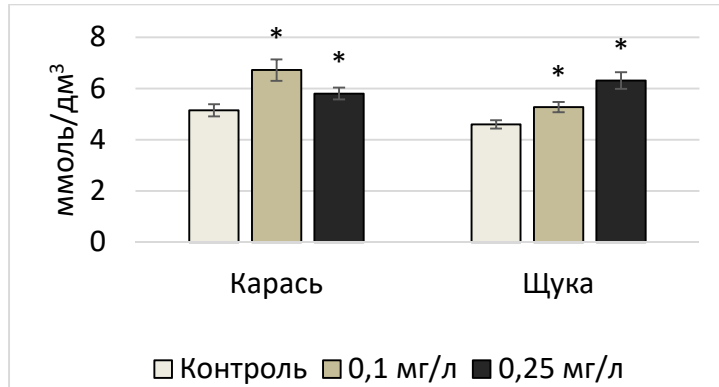


Рис. 2. Концентрація глюкози у плазмі крові риб за дії сублетальних концентрацій кобальту ($M \pm m$, $n=5$).

Концентрація лактату у крові карася контрольної групи риб була вищою порівняно зі щукою: 1,6 та 1,2 ммоль/дм³ відповідно (рис. 3). Це, ймовірно, обумовлене різним метаболізмом у бентофагів та хижих риб.

Вміст лактату в крові риб дослідних груп насамперед залежав від концентрації іонів металу в середовищі. Концентрація молочної кислоти в крові карася зростала в 1,4 раза за дії 0,1 мг/дм³ та поверталася до контрольних значень при 0,25 мг/дм³ іонів Co^{2+} у воді. У крові щуки вміст лактату практично не змінювався за 0,1 мг/дм³ іонів кобальту та зростав у 1,5 раза за дії 0,25 мг/дм³ іонів металу, що може бути обумовлене активізацією анаеробних процесів.

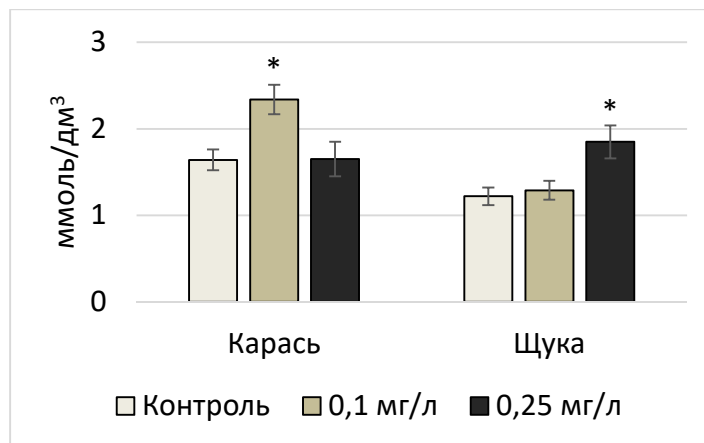


Рис. 3. Концентрація лактату у крові риб за дії сублетальних концентрацій кобальту ($M \pm m$, $n=5$).

Концентрація пірвіноградної кислоти в крові контрольних груп карася та щуки становила 90,5 та 135,4 мкмоль/дм³ відповідно (рис. 4). Вміст пірватату в крові риб за дії меншої концентрації іонів кобальту практично не змінювався. Вплив 0,25 мг/дм³ іонів металу призводив до зростання кількості цього метаболіту в крові карася в 1,6 раза та зменшення його концентрації в 1,3 раза в щуки.

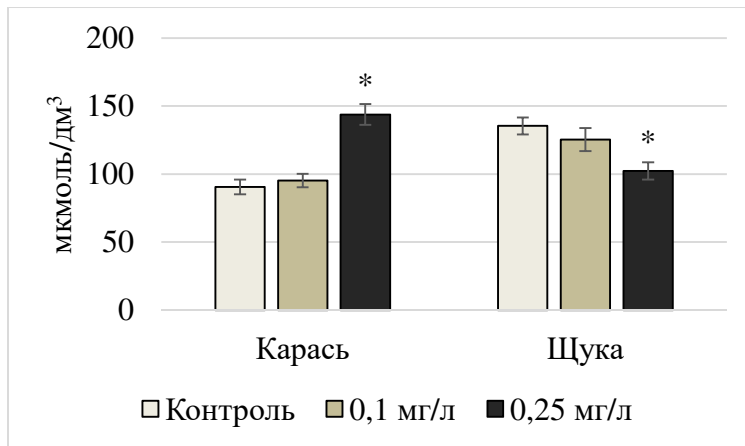


Рис. 4. Концентрація пірувату в крові риб за дії сублетальних концентрацій кобальту ($M \pm m$, $n=5$).

Зростання співвідношення концентрації лактату до пірувату в крові може мати важливе діагностичне значення та свідчити про активацію анаеробних процесів в організмі тварин [6]. Співвідношення лактат/піруват у крові карася зростало у 1,3 раза за дії 0,1 мг/дм³ та зменшувалося у 1,6 раза за 0,25 мг/дм³ іонів металу (рис. 5). Відношення концентрацій молочної кислоти до піровиноградної в крові щуки було меншим порівнюючи з карасем. Було виявлено тенденцію зростання цього показника в крові щуки пропорційно концентрації іонів кобальту у воді.

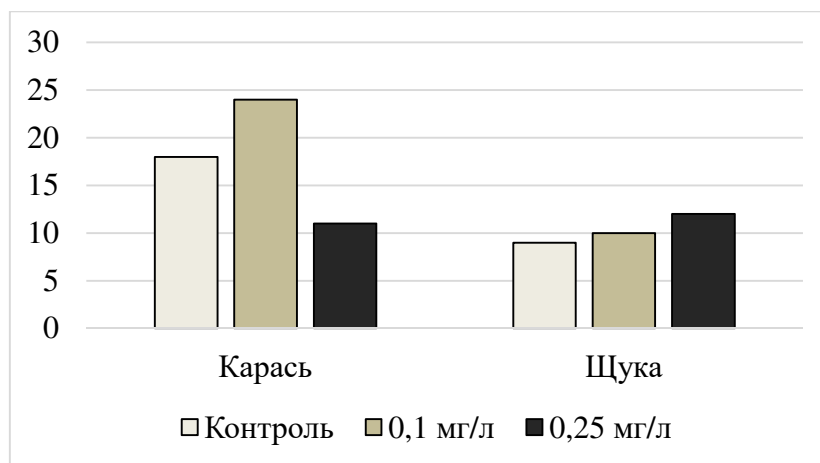


Рис. 5. Відношення концентрації лактат/ піруват у крові риб за дії сублетальних концентрацій кобальту ($M \pm m$, $n=5$).

Аналіз активності лактатдегідрогенази (ЛДГ) у плазмі крові риб (рис. 6) показав позитивну кореляцію цього показника із співвідношенням лактат/піруват. Так, активність фермента у крові карася зростала в 1,6 раза за дії 0,1 мг/дм³ та знижувалася у 2,3 раза за 0,25 мг/дм³ іонів металу. У плазмі крові щуки активність ЛДГ зростала із збільшенням концентрації металу у воді, що може бути наслідком токсичного стресу.

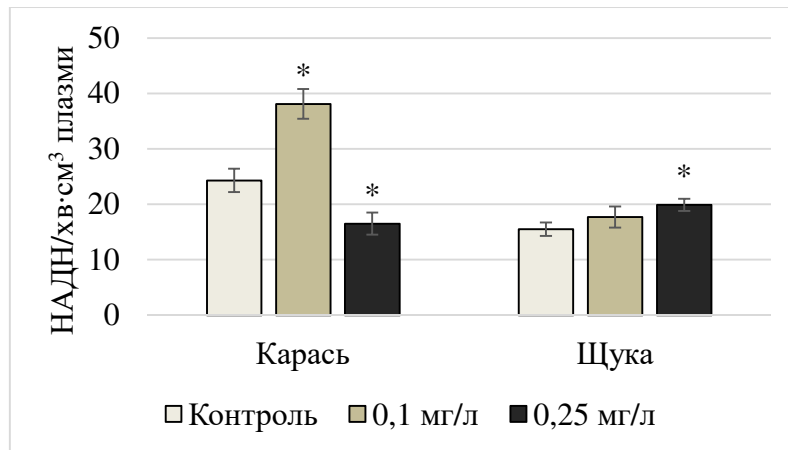


Рис. 6. Активність лактатдегідрогенази у крові риб за дії сублетальних концентрацій кобальту (мкмоль НАДН/хв·мл плазми, $M \pm m$, $n=5$).

Отже, під час дослідження виявлено видові особливості реакцій риб на вплив сублетальних концентрацій кобальту у воді. У щуки за високих концентрацій іонів кобальту у воді (0,25 мг/дм³), на відміну від карася, зростає роль анаеробних процесів енергозабезпечення організму про що свідчить зростання концентрації лактату та активності ЛДГ разом зі зниженням кількості пірувату. У карася виявлено активацію анаеробного метаболізму за нижчої (0,1 мг/дм³) концентрації іонів металу у воді.

1. Afanasyev S. O. Impact of War on Hydroecosystems of Ukraine: Conclusion of the First Year of the Full-Scale Invasion of Russia (a Review). *Hydrobiological Journal*. 2023. Vol. 59. No. 4. P. 3–16. URL: <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v59.i4.10>.
2. Dando P. R. Lactate Metabolism in Fish. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*. 1969. Vol. 49(1). P. 209–223.
3. DeForest D. K., Brix K. V., Adams W. J. Assessing metal bioaccumulation in aquatic environments: The inverse relationship between bioaccumulation factors, trophic transfer factors and exposure concentration. *Aquatic Toxicology*. 2007. Vol. 84, No. 2. P. 236–246. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2007.02.022>.
4. Heavy metal pollution in the aquatic environment: efficient and low-cost removal approaches to eliminate their toxicity: a review / K. H. Hama Aziz et al. *RSC Advances*. 2023. Vol. 13, No. 26. P. 17595–17610. URL: <https://doi.org/10.1039/d3ra00723e>.
5. Nutrient composition of important fish species in Bangladesh and potential contribution to recommended nutrient intakes / J. R. Bogard et al. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2015. Vol. 42. P. 120–133. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.03.002>.
6. Padmavathy P., Ramanathan N., Francis T. Glucose, Lactate and Pyruvate Metabolism in *Labeo rohita* with Reference to Ambient Oxygen. *Asian Fisheries Science*. 2003. Vol. 16, No. 1. URL: <https://doi.org/10.33997/j.afs.2003.16.1.006>.
7. Perrault J. R., Buchweitz J. P., Lehner A. F. Essential, trace and toxic element concentrations in the liver of the world's largest bony fish, the ocean sunfish (*Mola mola*). *Marine Pollution Bulletin*. 2014. Vol. 79, No. 1-2. P. 348–353. URL: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.11.026>.
8. Reproducible 1H NMR-Based Metabolomic Responses in Fish Exposed to Different Sewage Effluents in Two Separate Studies / L. M. Samuelsson et al. *Environmental Science & Technology*. 2011. Vol. 45, No. 4. P. 1703–1710. URL: <https://doi.org/10.1021/es104111x>.
9. Simonsen L. O., Harbak H., Bennekou P. Cobalt metabolism and toxicology—A brief update. *Science of The Total Environment*. 2012. Vol. 432. P. 210–215. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.009>.
10. The Alterations in the Hematological Parameters of Brown Trout *Salmo trutta fario*, Exposed to Cobalt Chloride / M. Atamanalp et al. *Journal of Animal and Veterinary Advances*. 2010. Vol. 9, No. 16. P. 2167–2170. URL: <https://doi.org/10.3923/javaa.2010.2167.2170>.
11. Van der Oost R., Beyer J., Vermeulen N. P. E. Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. 2003. Vol. 13, No. 2. P. 57–149. URL: [https://doi.org/10.1016/s1382-6689\(02\)00126-6](https://doi.org/10.1016/s1382-6689(02)00126-6).
12. Vanderlinde R. E. Measurement of total lactate dehydrogenase activity. *Ann. Clin. Lab. Sci.* 1985. Vol. 15(1). P. 13–31.

N. O. Vovchek

Ternopil Volodymyr Hnatyuk National Pedagogical University, Ukraine

INFLUENCE OF SUBLETHAL CONCENTRATIONS OF COBALT (II) IONS ON HEMATOLOGICAL INDICATORS IN THE ORGANISM OF FRESHWATER FISH

The study examined changes in selected biochemical indicators (glucose, lactate, pyruvate levels, and lactate dehydrogenase activity) in the blood of crucian carp (*Carassius gibelio* Bloch) and pike (*Esox lucius* L.) exposed to 0.1 and 0.25 mg/dm³ of Co²⁺ ions in water. The results demonstrated that changes in the hematological parameters of fish are species-specific and depend on the concentration of metal ions in the aquatic environment.

Despite exposure to sublethal concentrations of cobalt ions, the metal content in the blood of both fish species remained unchanged; however, in crucian carp, it was an order of magnitude lower than in pike. An increase in glucose concentration was observed in both species at both cobalt concentrations. Lactate levels in crucian carp increased under 0.1 mg/dm³ exposure, whereas in pike, they rose at 0.25 mg/dm³. Pyruvate concentration in crucian carp increased at 0.25 mg/dm³, whereas in pike, it decreased proportionally to the cobalt concentration in water.

A positive correlation was observed between the lactate/pyruvate ratio and lactate dehydrogenase activity in the blood of both species at elevated cobalt concentrations. These findings suggest that in pike, at higher cobalt concentrations (0.25 mg/dm³), glycolytic processes play an increased role in the organism's energy supply.

Key words: pike, crucian carp, blood, cobalt.

Надійшла 29.11.2024.

UDC 547.458:664.16

doi: 10.25128/2078-2357.24.3-4.3

¹KHMELIAR INESA, ¹KUSHNIR LESIA, ²VOLODYMYR TKACH

¹Municipal establishment of higher education "Rivne Medical Academy"

St. Karnaukhova, 53, Rivne, 33000

²Yuriy Fedkovich Chernivtsi National University

St. Kotsiubynskoho, 2, Chernivtsi, 58002

STUDY OF SUCRALOSE CONTENT IN CARBONATED DRINKS OF DIFFERENT MANUFACTURES

It was established that spectroscopic and chromatographic methods of analyzing were used to determine sucralose. Given that the spectroscopic method of analysis requires specific preparation of samples is insufficiently accurate and sensitive, and the chromatographic method is expensive, the electro-analytical method of determination was chosen for the research. This is justified by the structure of the molecule (it contains functional groups that can be oxidized electrochemically). Electrochemical experiments were carried out using a potentiostat-galvanostat on a three-electrode setup with a glassy carbon electrode as a working electrode, a platinum electrode as an auxiliary electrode and a silver chloride electrode for comparison. The study utilized non-carbonated beverages Continente (Portugal) and Xixo (Hungary), as well as carbonated beverages Sumol Zero (Portugal) and Fanta Shokata (Ukraine). The manufacturer indicated the presence of sucralose in all of them. Based on the conducted research and corresponding calculations, it was established that the beverages are safe for consumption.

Natural processes of photo-, photoelectro-, and electrodegradation in soil and wastewater reduce the problems of sucralose accumulation in the environment. Therefore, to prevent diffusion to the anode space with the release of gaseous chlorine, membrane electrolysis is applied (the membrane is made of polyvinylpyridine), which separates the cathode and anode spaces and does not allow chloride ions to reach the anode. In this case, water electrolysis or electrooxidation of hydroxyl ions occurs at the anode with the formation of gaseous oxygen.

Electroanalytical determination of sucralose was also conducted using the method of cyclic voltammetry. The fact that the electrochemical determination of sucralose took place can be judged by a gradual but sharp increase in the current value at certain potential values. In this case, the intensity of this increase depends on the concentration of the sweetener.

A solution with a neutral pH level was used as the background electrolyte. Materials based on carbon (graphite, carbon nanotubes) were used as the working electrode.

We proposed a new method for determining sucralose, associated with the dependence of the peak current value during its electrochemical oxidation on the concentration. At the same time, a linear relationship between the peak current value and the sweetener concentration is maintained.

Key words: sucralose, electrochemical determination, cyclic voltammograms, membrane electrolysis, carbonated drinks, background electrolyte.

Sucralose is almost entirely excreted from the body, does not penetrate the brain, does not raise blood sugar levels, is resistant to oral bacteria, and its use as a sugar substitute is increasing. At the same time, the widespread use of sucralose, its relatively high stability, minimal biodegradation in sewage systems and treatment facilities, prompted researchers to consider the possibility of using this compound as a reliable molecular marker for identifying sources of pollution in natural water bodies. The use of sucralose and its impact on life processes are described in many scientific works [1–5]. These studies have drawn attention to chlorinated sweeteners that are metabolically active and can disrupt metabolism by negatively affecting thyroid hormone metabolism. It has also been established that there are certain metabolites of sucralose whose safety profiles are currently unknown [3, 4, 5]. Additionally, tests using several different methodologies have shown the presence of mutagenic properties in sucralose hydrolysis products, as well as the possibility of forming potentially toxic compounds—dioxins and tetrachlorodibenzofurans—under high temperatures. This factor is more pronounced when sucralose and its derivatives are used as components in anti-corrosion agents.

Therefore, there is a pressing need to determine the concentration of sucralose in various biological fluids, in carbonated beverages, and in the environment. In a number of works [6–10], methodologies used for determining sucralose are described. Specifically, the analytical profile of sucralose was studied using spectroscopic and chromatographic methods of analysis. However, the first method requires specific sample preparation, is insufficiently accurate and sensitive. The second method, although characterized by a high level of sensitivity, uses rather expensive equipment. Moreover, both methods are quite slow and labor-intensive.

The polarimetric method of analysis is widely used in pharmaceutical and food industries for analyzing substances, intermediates, determining the content of sugary substances or medicinal products, as well as for identifying specific substances and their origins. For identifying the composition of oils, the polarimetric method is used together with refractometry. The approaches analyzed in the scientists' works [6–10] were successfully utilized. Therefore, we decided to use the electroanalytical method of determination as an alternative, considering that sucralose is electrochemically active since it contains functional groups capable of electrochemical oxidation. To justify the use of this approach, we considered the following advantages: modernity, low cost, speed, selectivity, accuracy, and sensitivity.

The purpose of the article is to conduct the determination of sucralose in carbonated beverages and the environment.

Research task is to select the most modern, inexpensive, sensitive, and selective methods for determining sucralose.

Materials and methods of research

Electrochemical determination of sucralose was conducted using a potentiostat-galvanostat with curve registration, connected to an electrochemical cell. Electroanalytical determination of sucralose was performed using the method of cyclic voltammetry. A potential is applied to the anode, the magnitude of which cyclically changes within certain limits at a constant rate. In this process, an electric current passes through the cell containing a solution with sucralose, and the dependence of the current on the potential is graphically depicted. Here, the potential is plotted on the x-axis, and the current on the y-axis. Since the potential changes cyclically within certain limits, the graph of the dependence between the current and potential is called a cyclic voltammogram. The fact that the electrochemical

determination of sucralose took place can be judged by a gradual but sharp increase in the current value at certain potential values. In this case, the intensity of this increase depends on the concentration of the sweetener.

Research findings and their discussion

Sucralose (100 g of a colorless fine crystalline powder) was purchased from the sports nutrition store “Protein in Kyiv” (Kyiv, Ukraine) and used without further purification. Sucralose solutions with concentrations of 10^{-5} , 10^{-4} , 10^{-3} , and 10^{-2} mol/L were prepared in distilled water using serial dilution. The study utilized non-carbonated beverages Contimente (Portugal) and Xixo (Hungary), as well as carbonated beverages Sumol Zero (Portugal) and Fanta Shokata (Ukraine). In all of them, the manufacturer indicated the presence of sucralose. For the study, 25 ml of each beverage was taken without dilution. Electrochemical experiments were conducted using a PI-50 potentiostat-galvanostat on a three-electrode setup with a glassy carbon electrode as the working electrode, a platinum auxiliary electrode, and a silver-silver chloride (3M) reference electrode. Signal registration was carried out using a Keithley multimeter with data output to Microsoft Excel. At this stage, the potential window was chosen from -2.0 to +2.0 V with a potential sweep rate of 0.1 V/s. Figure 1 shows the cyclic voltammograms of sucralose solutions of known concentrations from 10^{-5} to 10^{-2} mol/L in concentration decreasing order:

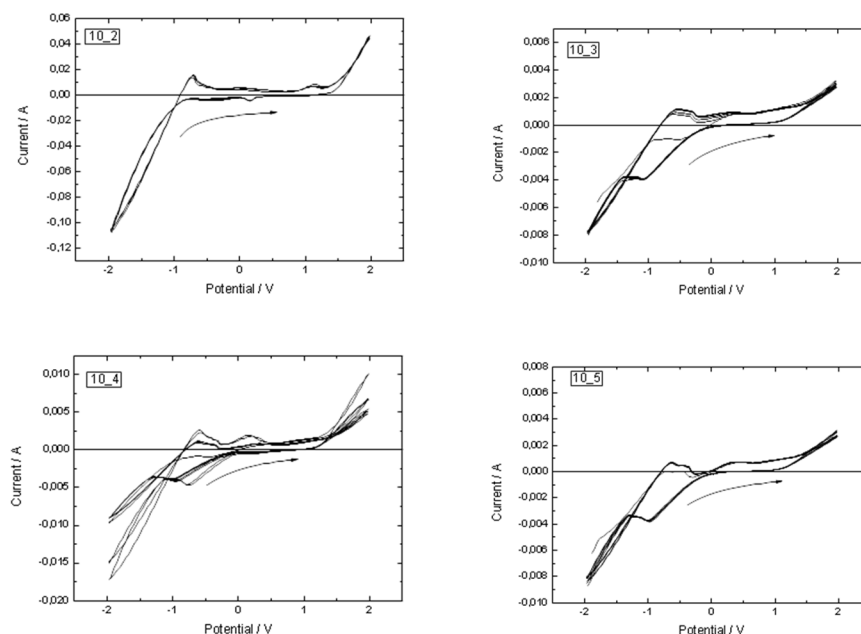


Fig. 1. Cyclic voltammograms of sucralose solutions with decreasing molar concentration.

As can be seen from the patterns of current increase depending on the potential, the electrooxidation of sucralose exhibits a sufficiently pronounced voltammetric profile. The first peak, which height depends on the concentration, is observed at a potential of -0.7 V and corresponds to the electrooxidation of the non-chlorinated hydroxymethyl group. In this process, an equal number of protons and electrons are released. The second peak, which potential approaches +1 V, corresponds to the oxidation of sucralose at the ring hydroxyl groups. The cathodic and anodic peaks at low and high potentials, respectively, describe the onset of the water electrolysis process. Regarding the oxidation of sucralose, the process is quasi-reversible at low concentrations of sucralose and irreversible at high concentrations, indicating the dependence of the kinetics of the oxidation process on pH. The electroanalytical process proceeds in a diffusion or kinetic mode depending on the concentration. There is a dependence between the peak current value and the concentration:

$$I = kC \tag{1}$$

Here, I – is the current, C - is the concentration, and k is the polarographic coefficient, which for this process is found by the formula:

$$k = \frac{I_2}{C_2} = \frac{0,018}{0,01} = 1,8 \quad (2)$$

The results of the voltammetric study of non-carbonated beverages Contimente (Portugal) and Xixo (Hungary) are shown in Figure 2.

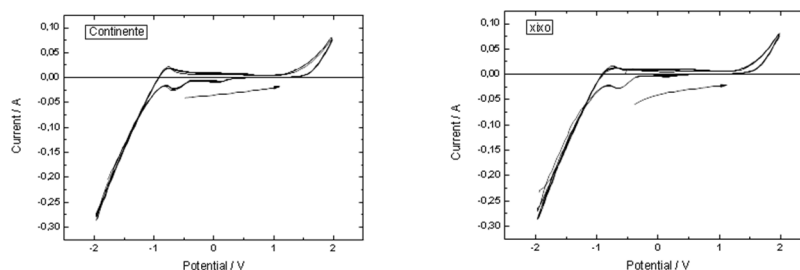


Fig. 2. Cyclic voltage-current curves of non-carbonated drinks.

The voltammetric peak that describes the electrooxidation of sucralose is present on both curves, confirming the presence of sucralose as declared by the beverage manufacturer. The appearance of additional reduction peaks may indicate both the quasi-reversibility of the sucralose electrooxidation process and the reduction of other components of the beverage (especially in the sample of the Portuguese-made beverage). Given that the peak current value in the Contimente beverage sample is 0.018 A, the sucralose concentration in it will be:

$$C = \frac{I}{k} = \frac{0,01926}{1,8} = 0,0107 \text{ M}$$

As for the Hungarian-made Xixo beverage, the peak current value was 0.01728 A. Accordingly:

$$C = \frac{I}{k} = \frac{0,01728}{1,8} = 0,0096 \text{ M}$$

Thus, the concentration of sucralose in non-alcoholic non-carbonated beverages is approximately 0.01 mol/L.

Calculating the amount of sucralose in a 200 ml package bottle of the Portuguese-made beverage:

$$m = CvM = 0,0107 * 0,2 * 397,5 = 0,85 \text{ г}$$

The volume of the Hungarian-made beverage package bottle is 1/3 L. Therefore:

$$m = CvM = 0,0 \frac{096 * 1}{3} * 397,5 = 1,27 \text{ г}$$

The maximum permissible daily intake of sucralose is 880 mg/kg of body weight. Therefore, the amount of sucralose in both beverages is within acceptable limits.

For a person weighing 80 kg, this corresponds to 70 g of sucralose, i.e. 0.177 mol. Accordingly, such an amount of sucralose would be contained in (taking into account the concentration of sucralose in the beverages):

$$v = \frac{m}{CM} = \frac{0,177}{0,0096} = 18,43 \text{ l of the Hungarian-made beverage}$$

та

$$v = \frac{m}{CM} = \frac{0,177}{0,0107} = 16,54 \text{ l of the Portuguese-made beverage}$$

Therefore, both beverages are safe for consumption.

Electrochemical studies of carbonated beverages containing sucralose from Portugal (left) and Ukraine (right) are presented in Figure 3:

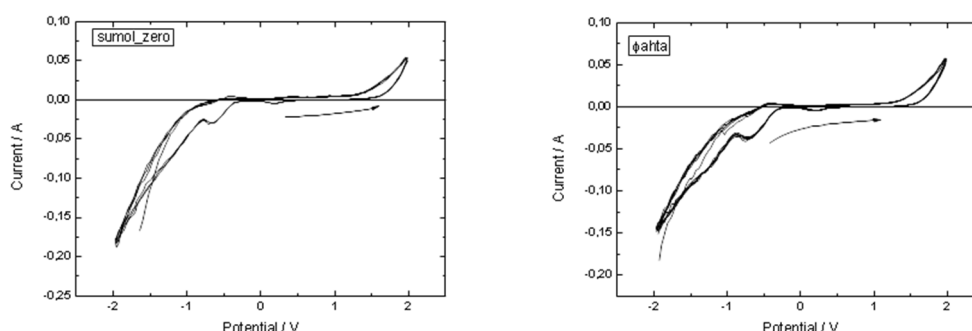


Fig. 3. Cyclic voltage current curves of carbonated drinks.

In this case, the sucralose oxidation peaks appear slightly at a potential of -0.5 V. This is because carbonated beverages contain orthophosphoric acid as an acidity regulator, and since the electrooxidation of sucralose occurs with the release of protons, according to Le Chatelier's principle, the equilibrium of the redox process will shift towards reducing their concentration, i.e., the reduction process, which is reflected by the cathodic peaks on both curves. Moreover, in carbonated beverages, the partial pressure of carbon dioxide is quite high, which also lowers the pH value. Therefore, to determine sucralose in carbonated beverages, the medium needs to be neutralized.

Furthermore, the distinct reduction peak observed at -0.8 V corresponds to the irreversible reaction of gradual sucralose dechlorination with the formation of chloride ions and deoxygalactosucrose:



As deoxygalactosucrose, unlike sucralose, is metabolized by a larger number of organisms, dechlorination can serve to purify wastewater from sucralose.

Since, as mentioned above, electrooxidation of sucralose is ineffective in acidic solution, and hydrolysis occurs in alkaline medium, a neutral pH solution maintained by a phosphate buffer should be used as the background electrolyte. Reducing the potential window (the difference between the minimum and maximum sweep potentials) allows for better manifestation of peak current values. It is proposed to use a carbon-based material (graphite, carbon nanotubes) as the working electrode. To increase sensitivity and selectivity, a substance with an active amino group or with a basic organic nitrogen atom can be used as a modifier of the electrode, which, interacting specifically with the chlorine atom in the sucralose molecule, will form a quaternary salt. Therefore, considering the above, the strategy of determination undergoes certain changes.

Determination Strategy:

First Stage: Preparation of sucralose solutions of known concentrations. Conduct cyclic voltammetric studies of these solutions with the addition of background electrolyte and buffer solution, based on which a calibration graph of the dependence of the peak current value on sucralose concentration is constructed.

Second Stage: Similar actions are performed with solutions of common natural carbohydrates without and with the addition of sucralose. This is necessary to determine the possibility and degree of selectivity in measuring the concentration of sucralose in beverages and other media.

Third Stage: Preparation of beverage samples that, according to the manufacturers, contain sucralose. The pH is neutralized using a buffer solution.

Fourth Stage: Conduct voltammetric analysis of beverage samples with sucralose. In this case, the influence of the presence of other substances (mainly ascorbic acid, hydroquinone derivatives, other carbohydrates, as well as sugar substitutes like tagatose and steviol) on the accuracy of the analysis is determined, as well as the possibility of simultaneous determination of sucralose and sugar concentrations. The use of electrode modifiers allows increasing the selectivity (specificity) of the method, reducing the cost of sucralose determination, shortening the analysis time, and increasing the accuracy of concentration determination. Based on the conducted studies, it was established that carbonated beverages contain a safe amount of sucralose and, therefore they are safe for consumption.

Regarding the problem of sucralose accumulation in the environment, it is addressed by natural processes of photo-, photoelectro-, and electrodegradation in soil and wastewater. Since anodic processes based on the Fenton reaction are not suitable for halogenated compounds due to the formation of toxic gaseous chlorine, cathodic degradation in a strongly acidic medium is applied. It has already been used for chlorarenes and trichloroacetic acid, so it is suitable for sucralose as well. In the main cathodic reaction, sucralose is reduced to deoxyhexoses and chloride ions. To prevent the diffusion of the latter to the anode space with the release of gaseous chlorine, membrane electrolysis is applied. A membrane made of polyvinylpyridine, which separates the cathode and anode spaces, does not allow chloride ions to reach the anode. In this case, water electrolysis or electrooxidation of hydroxyl ions occurs at the anode with the formation of gaseous oxygen. The scheme of sucralose degradation in a membrane electrolyzer is shown in Figure 4.

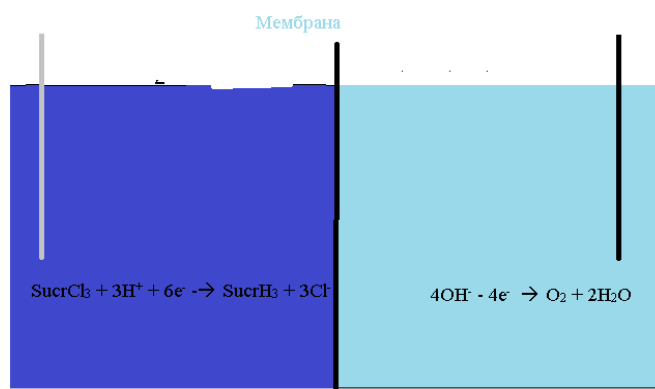


Fig. 4. Scheme of membrane electrolysis during sucralose degradation.

Electroanalytical determination of sucralose is performed using the method of cyclic voltammetry. A potential, the magnitude of which cyclically changes within certain limits at a constant rate, is applied to the anode. In this process, an electric current passes through the cell containing a solution with sucralose, and the dependence of the current on the potential is graphically depicted. The potential is plotted on the x-axis, and the current on the y-axis. Since the potential changes cyclically within certain limits, the graph is called a cyclic voltammogram.

The fact that the electrochemical determination of sucralose took place can be judged by a gradual but sharp increase in the current value at certain potential values. In this case, the intensity of this increase depends on the concentration of the sweetener.

A solution with a neutral pH level is used as the background electrolyte. Materials based on carbon (graphite, carbon nanotubes) are used as the working electrode.

Determination Stages

First Stage: Preparation of sucralose solutions of known concentrations. Conduct cyclic voltammetric studies of these solutions with the addition of background electrolyte, based on which a calibration graph of the dependence of the peak current value on sucralose concentration is constructed.

Second Stage: Preparation of beverage samples that, according to the manufacturers, contain sucralose.

Third Stage: Conduct voltammetric analysis of beverage samples with sucralose. This ensures the possibility of selective, rapid, and sensitive determination of sucralose in carbonated and non-carbonated beverages, which also contain common carbohydrates and other sugar substitutes, as well as in natural environments.

This allows us to compare the concentrations of sucralose with the maximum permissible levels for the human body and the environment. From this, we can judge the admissibility of consuming a particular beverage (pharmaceutical product, chewing gum, pastry).

Conclusions

Sucralose is used as a taste sweetener in the food industry and as an excipient (taste corrector) in the pharmaceutical industry during drug production. The wide range of sucralose use in human nutrition makes the process of its electrochemical determination in various environments, as well as its removal from wastewater and natural waters, relevant. We proposed a new method for determining sucralose, associated with the dependence of the peak current value during its electrochemical oxidation on the concentration. At the same time, a linear relationship between the peak current value and the concentration of the sweetener is maintained. Based on the conducted research, it was shown that the concentration of sucralose in non-alcoholic non-carbonated beverages is within the maximum permissible levels, according to the approved procedure by the National Commission of Ukraine with Codex Alimentarius and the Committee on Hygienic Regulation of the Ministry of Health of Ukraine.

This method, after refinement, can be applied for determining sucralose both in samples of biological fluids and in the environment. Our further research will focus on verifying the concentration of the working solution during the synthesis of anti-corrosion composites.

1. Кравченко І. Й. Підходи до визначення оцінки та класифікації речовин із солодким смаком. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2020. Т. 26, № 1. С. 71–81.
2. Косів Р. Підсолоджувальні речовини: класифікація, властивості, застосування в технології безалкогольних напоїв. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. 2023. № 4 (18). С. 51–57.
3. Ткач В., Сторощук М., Сілвіо С. де Олівейра, Лусінда В. душ Рейш, Яна Г. Іванушко, Адріано О. да Сілва, І. Ягодинець, Жолт О. Кормош, В. Луганська. Теоретичний опис електрохімічного визначення сукралози (E955) в напоях та фармакологічних формах на електроді, модифікованому провідним полімером із піридиновими атомами нітрогену. *Нанотехнології і наноматеріали у фармації та медицині* : матеріали V Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції з міжнародною участю. Харків : НФаУ, 2021, С. 80–82.
4. Ashwell M, Gibson S, Bellisle F, Buttriss J, Drewnowski A, Fantino M, Gallagher AM, de Graaf K, Gosciny S, Hardman CA, Laviada-Molina H, López-García R, Magnuson B, Mellor D, Rogers PJ, Rowland I, Russell W, Sievenpiper JL, la Vecchia C. Expert consensus on low-calorie sweeteners: facts, research gaps and suggested actions. *Nutr Res Rev*. 2020 Jun;33(1):145–154.
5. Coelho T. M. Photoacoustic spectroscopy as a tool for determination of food dyes: comparison with first derivative spectrophotometry. *Talanta*. 2010. P. 202–207.
6. Durán Agüero, S., Angarita Davila, L., Escobar Contreras, M. C., Rojas Gomez, D., & de Assis Costa, J. Noncaloric sweeteners in children: a controversial theme. *BioMed research international*. 2018 (1), 4806534.
7. Suez J., Korem T., Zeevi D., Zilberman-Schapira G., Thaiss C. A., Maza O., ... & Elinav E. Artificial sweeteners induce glucose intolerance by altering the gut microbiota. *Nature*. 2014. 514(7521), 181–186.
8. Tkach V. V.; Kushnir M. V.; de Oliveira S.C. et al. Some Theoretical Aspects of Lugduname Electrochemical Determination over an Undoped Poly (Naphthoquinone), *Mater Int.*, 2021. 3. 2. <https://doi.org/10.33263/Materials31.002>.
9. Tkach V. V., Kucher M. M., Kushnir M. V., Ivanushko Y. G., Akinay Y., Karakoyun N. Yogadynets P.I. Kormosh Z.O. The Theoretical Description for Psilocin Electrochemical Determination over CobaltOxyhydroxide. *Orbital Elec J. Chem*. 2023. 15, 27–30. <https://doi.org/10.17807/orbital.v15i1.18012>.
10. Yunker A. G., Alves J. M., Luo S., Angelo B., DeFendis A., Pickering T. A., ... & Page K. A. Obesity and sex-related associations with differential effects of sucralose vs sucrose on appetite and reward processing: a randomized crossover trial. *JAMA network open*. 2021. 4(9), e2126313-e2126313.

References

1. Kravchenko I. Y. Pidkhoty do vyznachennia otsinky ta klasyfikatsii rehovyn iz solodkym smakom. *Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnolohii*. 2020. T. 26, No 1. S. 71–81. [in Ukrainian]
2. Kosiv R. Pidsolodzhivalni rehovyny: klasyfikatsiia, vlastyvoli, zastosuvannia v tekhnolohii bezalkoholnykh napoiv. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Serii: *Novi rishennia u suchasnykh tekhnolohiiakh*. 2023. No 4 (18). S. 51–57. [in Ukrainian]
3. Tkach V., Storoshchuk M., Silvio S. de Oliveyra, Lusinda V. dush Reysh, Yana H. Ivanushko, Adriano O. da Silva, I. Yahodynets, Zholt O. Kormosh, V. Luhanska. Teoretychnyi opys elektrokhimichnoho vyznachennia sukralozy (E955) v napoiakh ta farmakolohichnykh formakh na elektrodi, modyfikovanomu providnym polimerom iz pirydynovymy atomamy nitrohenu. *Nanotekhnolohii i nanomaterialy u farmatsii ta medytsyni* : materialy V Vseukrainskoi naukovopraktychnoi internet-konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu. Xarkiv : NFaU, 2021, S. 80–82. [in Ukrainian]
4. Ashwell M, Gibson S, Bellisle F, Buttriss J, Drewnowski A, Fantino M, Gallagher AM, de Graaf K, Goscinny S, Hardman CA, Laviada-Molina H, López-García R, Magnuson B, Mellor D, Rogers PJ, Rowland I, Russell W, Sievenpiper JL, la Vecchia C. Expert consensus on low-calorie sweeteners: facts, research gaps and suggested actions. *Nutr Res Rev*. 2020 Jun;33(1):145–154.
5. Coelho T. M. Photoacoustic spectroscopy as a tool for determination of food dyes: comparison with first derivative spectrophotometry. *Talanta*. 2010. P. 202–207.
6. Durán Agüero, S., Angarita Davila, L., Escobar Contreras, M. C., Rojas Gomez, D., & de Assis Costa, J. Noncaloric sweeteners in children: a controversial theme. *BioMed research international*. 2018 (1), 4806534.
7. Suez J., Korem T., Zeevi D., Zilberman-Schapira G., Thaiss C. A., Maza O., ... & Elinav E. Artificial sweeteners induce glucose intolerance by altering the gut microbiota. *Nature*. 2014. 514(7521), 181–186.
8. Tkach V. V.; Kushnir M. V.; de Oliveira S.C. et al. Some Theoretical Aspects of Lugduname Electrochemical Determination over an Undoped Poly (Naphthoquinone), *Mater Int.*, 2021. 3. 2. <https://doi.org/10.33263/Materials31.002>.
9. Tkach V. V., Kucher M. M., Kushnir M. V., Ivanushko Y. G., Akinay Y., Karakoyun N. Yogadynets P.I. Kormosh Z.O. The Theoretical Description for Psilocin Electrochemical Determination over CobaltOxyhydroxide. *Orbital Elec J. Chem*. 2023. 15, 27–30. <https://doi.org/10.17807/orbital.v15i1.18012>.
10. Yunker A. G., Alves J. M., Luo S., Angelo B., DeFendis A., Pickering T. A., ... & Page K. A. Obesity and sex-related associations with differential effects of sucralose vs sucrose on appetite and reward processing: a randomized crossover trial. *JAMA network open*. 2021. 4(9), e2126313-e2126313.

¹I. M. Хмельяр, ¹Л. О. Кушнір, ²В. В. Ткач

¹Комунальний заклад вищої освіти «Рівненська медична академія»

²Чернівецький Національний університет імені Юрія Федьковича

ДОСЛІДЖЕННЯ ВМІСТУ СУКРАЛОЗИ У ГАЗОВАНИХ НАПОЯХ РІЗНИХ ВИРОБНИКІВ

Встановлено, що для визначення сукралози використовували спектроскопічний та хроматографічний методи аналізу. Враховуючи те, спектроскопічний метод аналізу вимагає специфічної підготовки проб, є недостатньо точний та чутливий, а хроматографічний – дорогий, то для проведення дослідження обрано електроаналітичний метод визначення. Це обґрунтовано будовою молекули сукралози (містить функціональні групи, здатні окиснюватися електрохімічно). Електрохімічні експерименти проводилися з допомогою потенціостату-гальваностату на трьохелектродній установці зі скловугільним електродом в якості робочого електроду, платиновим в якості допоміжного електроду із хлорсрібним електродом для порівняння. У дослідженні було використано негазовані напої Continente (Португалія) та Хіхо (Угорщина), а також газовані напої Sumol Zero (Португалія) та Fanta Shokata (Україна). У всіх із них виробник заявив присутність сукралози. На основі проведених досліджень та відповідних обрахунків встановлено, що напої є безпечними для вживання.

Природні процеси фото-, фотоелектро- та електродеградації у ґрунтових та стічних водах зменшують проблеми накопичення сукралози у навколишньому середовищі. Тому для уникнення дифузії до анодного простору з виділенням газоподібного хлору, застосовується мембранний електроліз (мембрану виготовляють з полівінілпіридину), що розділяє катодний та анодний простір, не пропускає хлорид-йон до аноду. При цьому на аноді відбувається електроліз води або електроокиснення гідроксил-йону з утворенням газоподібного кисню.

Електроаналітичне визначення сукралози проводили також методом циклічної вольтамперометрії. Про те, що електрохімічне визначення сукралози відбулося, можна судити за поступовим, але різким зростанням значення струму у певних значеннях потенціалу. При цьому інтенсивність цього зростання залежатиме від концентрації цукрозамінника.

В якості фонового електроліту використано розчин із нейтральним рівнем рН. В якості робочого електроду використовується матеріал на основі карбону (графіт, карбонові нанотрубки).

Нами запропоновано новий метод визначення сукралози, пов'язаний із залежністю пікового значення струму при її електрохімічному окисненні від концентрації. При цьому зберігається лінійна залежність між піковим значенням струму та концентрацією цукрозамінника.

Ключові слова: сукралоза, електрохімічне визначення, циклічні вольтамперограми, мембранний електрод, газовані напої, фоновий електроліт.

Надійшла 31.10.2024.

UDC 502/504:57(477.81) 577.47: 504.054

doi: 10.25128/2078-2357.24.3–4.4

¹К. YUNKO, ^{1,2}В. MARTYNIUK, ⁴В. KHOMA, ³Л. GNATYSHYNA, ¹О. MYKHALYUK, ¹В. BARANOVSKII, ¹М. GLADIUK, ¹Н. TUL Aidan, ³А. MUDRA, ^{1*}О. STOLIAR

¹Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University
M. Kryvonosa St. 2, Ternopil, 46027

²Ternopil Ivan Puluj National Technical University
Ruska St. 56, Ternopil, 46001

³I. Horbachevsky Ternopil National Medical University
Maidan Voli, 1, Ternopil, 46001

⁴Ternopil Scientific Research Forensic Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine
Budny St. 48, Ternopil, 46020

e-mail: Oksana Stoliar, e-mail: Oksana.Stolyar@tnpu.edu.ua

VULNERABILITY OF FRESHWATER MUSSEL *UNIO TUMIDUS* TO WATERBORNE MIXTURE OF PSYCHOACTIVE SUBSTANCES AND MICROPLASTIC

This study investigates the effects of psychoactive substances and microplastics (MP) on the aquatic environment using swollen river mussels (*Unio tumidus*) as bioindicators. Mussels were exposed to microplastic, caffeine, chlorpromazine and their mixture for 14 days and biochemical biomarkers of stress and toxicity were analysed. All exposures caused the signs of toxicity, indicated as the loss of lysosomal membrane stability, inactivation of choline esterase, and decrease of the Zn/Cu ratio. All exposures, particularly MP, increased the glutathione level, indicating the involving of low weight cellular thiols in the stress response. Exposure to MP induced superoxide dismutase, and mixture decreased phenol oxidase activity, confirming the negative cumulative effect of the combine exposure.

Key words: pharmaceuticals, antioxidants, copper, zinc, cumulative effect.

The modern life of humankind cannot be imagined without plural pharmaceutical and personal care products [1]. Particularly, nowadays, the psychoactive substances increasingly applicate due to the prevalence of stress, anxiety, and symptoms of post-traumatic stress disorder among the victims of military activities [14]. Correspondingly, they input into the surface waters, and these so-called 'micro pollutants' expected to create the mixtures with cumulative effects on the aquatic organisms [1, 3, 6]. The psychotropic pharmaceutical chlorpromazine (Cpz) was selected for this study as one of most popular drug not only in the schizophrenia curing, but also prospective pharmaceutical due to its antibacterial effect, antitumor activity, inhibition of the replication in different viruses including SARS-CoV-2 [6, 22]. Caffeine (Caff), a central nervous system stimulant, utilized both as medicine

and food supplement, is arguably the most frequently ingested pharmacologically active substance in the world [1]. Consequently, its level in the surface waters is recommended to be the marker of anthropogenic pollution [24].

The realistic approach in the aquatic ecotoxicology of 'micro pollutants' must provide the study of chemical mixtures [16, 19]. Particular attention in their composition causes the microplastics (MP), widespread aquatic pollutant and suspected sorbent of hydrophobic substances like Cpz and Caff on the surface of particles [2]. The distortion of the responses to some pharmaceuticals in the exposures to their mixtures with MP was reported [16, 17].

The bivalve molluscs are recognized sentinel organisms in the assessment of the pollution due to the sessile habitats, filter-feeding and worldwide distribution [10, 11]. Therefore, to approximate exposure conditions to the environmental relevance, the goal of this study was to indicate whether the approved biochemical indexes of stress and toxicity in bivalves are the suitable biomarkers of vulnerability of the mussels to the combination of these substances and MP. The essential metals Zn and Cu accumulation was also included in the expertise according to the previous experience of its application [17].

Materials and methods of research

Caffeine of pharmaceutical quality was provided by PJSC SIC "Borshchahivskiy CPP", all other reagents/chemicals were of the highest analytical grade available and purchased from Sigma-Aldrich (St. Louis, MO), or Synbias (Kyiv, Ukraine).

The adult male specimens of swollen river mussel *Unio tumidus* (mean length 9.1-10.4 cm, weight 56-90 g) were collected in the summer (July) at the middle stream of the Dniester River basin (the Seret River), Ukraine. About 200 individuals were acclimated to the laboratory conditions for up to seven days after the capture as it was described earlier [15]. Then, molluscs were distributed randomly to four groups: untreated mussels (C) and treated with MPs (1 mg L⁻¹), Caff (20 µg L⁻¹), Cpz (12 ng L⁻¹) and their mixture (Mix) during 14 days at the temperature 18° C. After exposures, molluscs were immediately dissected on ice. The digestive gland tissue was dissected and utilized for study. All steps were carried out at 4°C. The single-use samples were frozen (-40 °C) until analyzed. Soluble protein concentration in the supernatant of 10% homogenate of digestive gland was measured according to the method of Lowry *et al.* (1951) [12], using bovine serum albumin as the protein standard.

Lysosomal membrane stability (lysosomal integrity) as an index of vitality was determined in the digestive gland by the Neutral Red Retention (NRR) assay spectrophotometrically [4] and expressed in the relative units per g of FW. The elevation of the light absorption corresponded to the loss of membrane stability. For the neurotoxicity evaluation, the cholinesterase (ChE, EC 3.1.1.7) activity in the tissue homogenate was determined colorimetrically utilizing acetylcholine iodide (ATCh) as substrate and the 5,5-dithiobis-2-nitrobenzoate (DTNB) as the thiol indicator [5] and calculated using a molar extinction coefficient of 14.15·10³ M⁻¹·cm⁻¹, and referred to the soluble protein content. The SOD (EC 1.15.1.1) activity in the soluble phase of the tissue homogenate, was determined according to the non-enzymatic assay based on aerobic reduction of nitro-blue tetrazolium (NBT) in the presence of phenazine methosulphate (PMS) and NADH [7] and expressed in the SOD units per mg of soluble protein (one unit is defined as the amount of enzyme that causes 50% inhibition of NBT reduction). The phenoloxidase-like activity (PhO, EC 1.14.18.1) was determined by recording the formation of o-quinones utilizing p-phenylenediamine (PPD) as substrate [13]. The results were expressed in international units (IU) per mg of soluble protein. One IU was defined as the amount of enzyme that catalyzes the appearance of 1 µmol of product per min using the molar extinction coefficient of PPD reaction product of 43 160 M⁻¹ cm⁻¹. Total glutathione (GSH) concentration was quantified by the glutathione reductase recycling assay [8] in the protein-free extract of 10% w/v homogenate. Standards were prepared from reduced glutathione, and concentrations were expressed as µmol per g wet weight.

The concentration of Zn in the digestive gland after the digestion of samples with HNO₃ was measured utilizing the reaction of the complexation of Zn(II) with 2-(5-bromo-2-pyridylazo)-5-[N-propyl-N-(3-sulfopropyl) amino]phenol disodium salt dihydrate (5-Br-PAPS) [25], evaluated from the absorbance of the metal-5-Br-PAPS complex at 560 nm. Cu assay in the soft tissues was accomplished

by the spectrophotometric assay utilizing cuprizone (Copper Test. 1.14767 - Merck Millipore). Calculation was made utilizing the molar extinction coefficient of $16,000 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ at 600 nm.

Results were expressed as mean \pm standard deviation. For all traits, the sample size was eight from eight individuals. Shapiro-Wilk test was used for the assessment of normality. Data were analysed using parametric Student's t-test with Bonferroni correction significant at $p < 0.01$. The adequacy of data was evaluated based on the value of the KMO and Bartlett's test of sphericity. The IBM SPSS Statistics version 26 software for Windows was used for calculations.

Research findings and their discussion

Compared to the control, all exposures caused the increase of lysosome membranes instability (Fig. 1A). For the ChE, the prominent oppression (up to 2.6 times by MP and Cpz) was identified in all exposures (Fig. 1B).

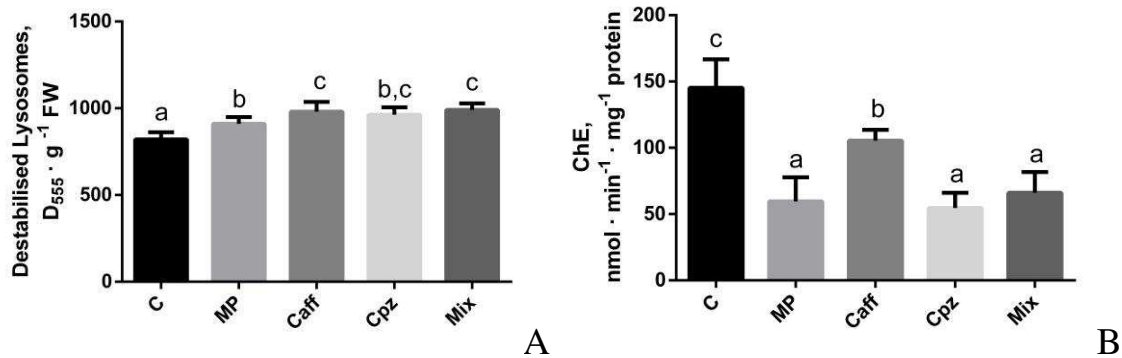
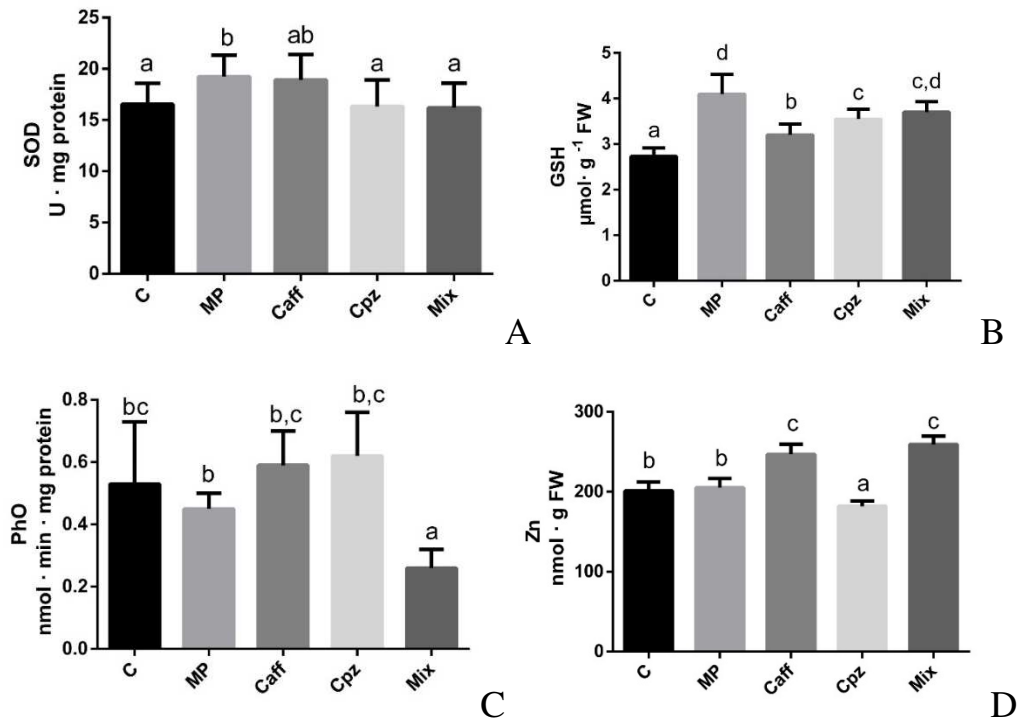


Fig. 1. Toxicity markers in the digestive gland of bivalve mollusc *U. tumidus* exposed to microplastics (MP), caffeine (Caff), chlorpromazine (Cpz) and their mixture during 14 days, $M \pm SD$, $N=8$. A - lysosomal membrane instability (NRR test); B - cholinesterase (ChE) activity. Different letters indicate the difference between the exposed and control groups, P -value < 0.01 .

The SOD was significantly activated only by MP and did not change against control in other exposures (Fig 2A). The level of GSH was more sensitive and increased in all exposures, particularly by MP (Fig. 2B). The activity of PhO was oppressed substantially (by ≈ 2.0 times against control) only under the exposure to Mix and did not differ significantly in all other exposures (Fig. 2C).



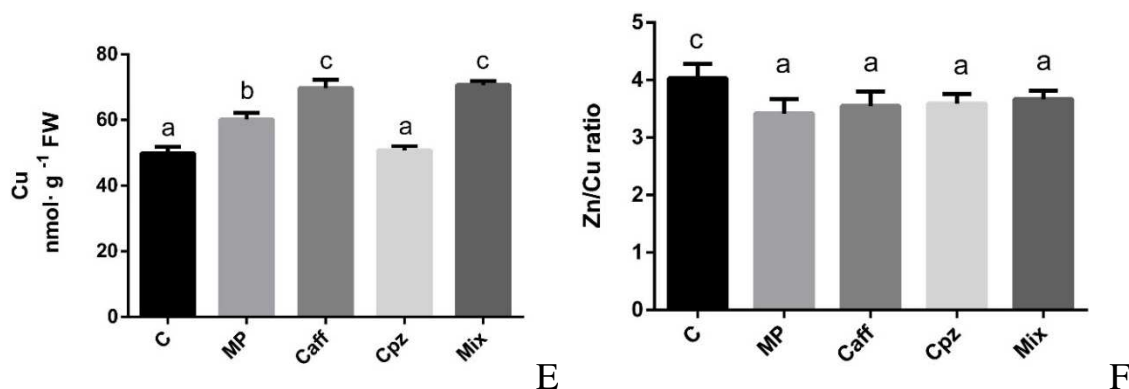


Fig. 2. The markers of stress and essential metals level in the digestive gland of bivalve mollusc *U. tumidus* exposed to microplastics (MP), caffeine (Caff) and chlorpromazine (Cpz) and their mixture during 14 days, $M \pm SD$, $N=8$. A - superoxide dismutase (SOD) activity; B - total glutathione (GSH) level; C - phenoloxidase (PhO) activity; D - concentration of Zn; E - concentration of Cu; F - the ratio of Zn/Cu concentrations. Different letters indicate the difference between the exposed and control groups, P-value < 0.01.

The concentrations of Zn and Cu in the digestive gland were changed comparing to control in most exposures. The level of Zn decreased in the Cpz-group and increased by Caff and Mix (Fig 2D). The concentration of Cu increased in all exposures, except Cpz, up to 40% (Fig. 2E). Correspondingly, the Zn/Cu ratio decreased against control from 4.0 up to 3.6 in all exposures (Fig. 2F).

According to our results, the signs of toxicity were detected in each exposure. The most prominent signs of toxicity were evident as the ChE depletion, confirming the worth of this marker to indicate the impact of environmentally relevant concentrations of diverse xenobiotics in bivalve molluscs [18]. Concerning the Cpz, the inability to utilize acetylcholine can occur, distorting the nervous system coordination [21]. The NRR test is approved in the plural studies as the index of cell viability [20]. This is explained by the lysosomes property to be the specific target for the accumulation of different pollutants. Our study confirms this response even for the extremely low concentrations of contaminants, particularly for Cpz. Similarly, the decrease in the lysosomal membrane stability was confirmed for the effect of MP, Caff and their mixture, and Cpz on the marine mussel *Mytilus galloprovincialis* [9, 10].

Comparing the manifestations of stress, it can be assumed that the responses of GSH were most prominent, indicating the activation of antioxidant response, particularly by MP. The important role of GSH in the adaptation of bivalve mollusc to MP and pharmaceuticals was shown previously [16].

The particular sensitivity of PhO, the marker of inflammation, was the most valuable sign of the vulnerability of defence forces and the negative cumulative effect of MP, Caff and Cpz mixture. The decrease of immune response as the major target for environmentally relevant mixtures of pharmaceuticals in molluscs was described earlier [3] and consistent with our results.

At last, the impact of all exposures was evident from the Zn/Cu concentrations assessment. Importantly, our results confirm that the ratio of these essential metals in the mussels can be utilized for the assessment of their health status. Meanwhile, phenothiazines inhibit the binding of Ca to Ca-dependent proteins [22], and the interaction of Ca and Zn transport particularly for mussels is well known [23]. Hence, this effect can be a specific target for the phenothiazine Cpz.

Summarizing, the freshwater mussels *U. tumidus* can provide early warning of emerging environmental health hazards caused by psychoactive substances and their combination with MP. The depletion of Zn/Cu ratio in molluscs can be recommended as the simple index of environmental health disturbance, and the phenol oxidase activity for the indication of multi-stress impact.

ACKNOWLEDGMENTS AND FUNDING SOURCE

Funding. This work has been granted by the Ministry of Education and Science of Ukraine to Oksana Stoliar (Project No M/48-2024 under the Lithuanian-Ukrainian Cooperation Program).

1. Adenaya A., Quintero R. R., Brinkhoff T., Lara-Martín P. A., Wurl O., Ribas-Ribas M. Vertical distribution and risk assessment of pharmaceuticals and other micropollutants in southern North Sea coastal waters. *Mar Pollut Bull.* 2024. Vol. 200. P. 116099. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116099>.
2. Amelia T. S. M., Khalik W. M. A. W. M., Ong M. C., Shao Y. T., Pan H. J., Bhubalan K. Marine microplastics as vectors of major ocean pollutants and its hazards to the marine ecosystem and humans. *PEPS.* 2021. Vol. 8. P. 1–26. <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00405-4>.
3. Balbi T., Auguste M., Ciacci C., Canesi L. Immunological Responses of Marine Bivalves to Contaminant Exposure: Contribution of the -Omics Approach. *Front Immunol.* 2021. Vol. 12. P. 618726. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.618726>.
4. El Haj Y., Bohn S., Souza M. M. Tolerance of native and invasive bivalves under herbicide and metal contamination: an *ex vivo* approach. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2019. Vol. 26. P. 31198–31206. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06256-x>.
5. Ellman G. L., Courtney K. D., Andres V. Jr., Feather-Stone R. M. A new and rapid colorimetric determination of acetylcholinesterase activity. *Biochem Pharmacol.* 1961. Vol. 7. P. 88–95. [https://doi.org/10.1016/0006-2952\(61\)90145-9](https://doi.org/10.1016/0006-2952(61)90145-9).
6. Escudero J., Muñoz J. L., Morera-Herreras T., Hernandez R., Medrano J., Domingo-Echaburu S., Barceló D., Orive G., Lertxundi U. Antipsychotics as environmental pollutants: An underrated threat? *Sci Total Environ.* 2021. Vol. 769. P. 144634. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144634>.
7. Fried R. Enzymatic and non-enzymatic assay of superoxide dismutase. *Biochimie.* 1975. Vol. 57. P. 657–660. [https://doi.org/10.1016/s0300-9084\(75\)80147-7](https://doi.org/10.1016/s0300-9084(75)80147-7).
8. Griffith O. W. Determination of glutathione and glutathione disulfide using glutathione reductase and 2-vinylpyridine. *Anal. Biochem.* 1980. Vol. 106. P. 207–212. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(80\)90139-6](https://doi.org/10.1016/0003-2697(80)90139-6).
9. Impellitteri F., Yunko K., Calabrese G., Porretti M., Martyniuk V., Gnatyshyna L., Nava V., Potortì A. G., Piccione G., Di Bella G., Stoliar O., Faggio C. Chlorpromazine's impact on *Mytilus galloprovincialis*: a multi-faceted investigation. *Chemosphere.* 2024. Vol. 350. P. 141079. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.141079>.
10. Impellitteri F., Yunko K., Martyniuk V., Matskiv T., Lechachenko S., Khoma V., Mudra A., Piccione G., Stoliar O., Faggio C. Physiological and biochemical responses to caffeine and microplastics in *Mytilus galloprovincialis*. *Sci Total Environ.* 2023. Vol. 890. P. 164075. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164075>.
11. Khan B., Ho K. T., Burgess R. M. Application of Biomarker Tools Using Bivalve Models Toward the Development of Adverse Outcome Pathways for Contaminants of Emerging Concern. *Environ Toxicol Chem.* 2020. Vol. 39. P. 1472–1484. <https://doi.org/10.1002/etc.4757>.
12. Lowry O. H., Rosebrough N. J., Farr A. L., Randall R. J. Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J Biol Chem.* 1951. Vol. 193. P. 265–275.
13. Luna-Acosta A., Breitwieser M., Renault T., Thomas-Guyon H. Recent findings on phenoloxidases in bivalves. *Mar Pollut Bull.* 2017. Vol. 122. P. 5–16. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.031>.
14. Lushchak O., Velykodna M., Bolman S., Strilbytska O., Berezovskyi V., Storey K. B. Prevalence of stress, anxiety, and symptoms of post-traumatic stress disorder among Ukrainians after the first year of Russian invasion: a nationwide cross-sectional study. *Lancet Reg Health Eur.* 2023. Vol. 36. P. 100773. <https://doi.org/10.1016/j.lanep.2023.100773>.
15. Martyniuk V., Khoma V., Matskiv T., Yunko K., Gnatyshyna L., Stoliar O., Faggio C. Combined effect of microplastic, salinomycin and heating on *Unio tumidus*. *Environ Toxicol Pharmacol.* 2023. Vol. 98. P. 104068. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2023.104068>.
16. Martyniuk V., Matskiv T., Yunko K., Khoma V., Gnatyshyna L., Faggio C., Stoliar O. Reductive stress and cytotoxicity in the swollen river mussel (*Unio tumidus*) exposed to microplastics and salinomycin. *Environ Pollut.* 2024. Vol. 350. P. 123724. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123724>.
17. Matskiv T., Stoliar O. Biochemical responses of the *Dreissena polymorpha* from municipal pond to caffeine, microplastics, and heating in single and combined exposures. *Studia biologica.* 2023. Vol. 17. P. 27–42. <http://dx.doi.org/10.30970/sbi.1702.717>.
18. Moncaleano-Niño A. M., Luna-Acosta A., Gómez-Cubillos M. C., Villamil L., Ahrens M. J. Cholinesterase activity in the cup oyster *Saccostrea* sp. exposed to chlorpyrifos, imidacloprid, cadmium and copper. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018. Vol. 151. P. 242–254. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.12.057>.
19. Morais T., Moleiro P., Leite C., Coppola F., Pinto J., Henriques B., Soares A. M. V. M., Pereira E., Freitas R. Ecotoxicological impacts of metals in single and co-exposure on mussels: Comparison of observable and predicted results. *Sci Total Environ.* 2023. Vol. 881. P. 163165. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163165>.
20. Pantea E. D., Coatu V., Damir N. A., Oros A., Lazar L., Rosoiu N. Lysosomal Membrane Stability of Mussel (*Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819) as a Biomarker of Cellular Stress for Environmental Contamination. *Toxics.* 2023. Vol. 11. P. 649. <https://doi.org/10.3390/toxics11080649>.

21. Silva C. O., Novais S. C., Alves L. M. F., Soares A. M. V. M., Barata C., Lemos M. F. L. Linking cholinesterase inhibition with behavioural changes in the sea snail *Gibbula umbilicalis*: Effects of the organophosphate pesticide chlorpyrifos. *Comp Biochem Physiol C Toxicol Pharmacol*. 2019. Vol. 225. P. 108570. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2019.108570>.
22. Varga B., Csonka Á., Csonka A., Molnár J., Amaral L., Spengler G. Possible Biological and Clinical Applications of Phenothiazines. *Anticancer research*. 2017. Vol. 37. P. 5983–5993. <https://doi.org/10.21873/anticancer.12045>.
23. Vercauteren K., Blust R. Uptake of cadmium and zinc by the mussel *Mytilus edulis* and inhibition by calcium channel and metabolic blockers. *Marine Biology*. 1999. Vol. 135. P. 615–626. <https://doi.org/10.1007/s002270050662>.
24. Vieira L. R., Soares A. M. V. M., Freitas R. Caffeine as a contaminant of concern: A review on concentrations and impacts in marine coastal systems. *Chemosphere*. 2022. Vol. 286. P. 131675. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131675>.
25. Wang J., Niu Y., Zhang C., Chen Y. A micro-plate colorimetric assay for rapid determination of trace zinc in animal feed, pet food and drinking water by ion masking and statistical partitioning correction. *Food Chemistry*. 2018. Vol. 245. P. 337–345. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.054>.

¹К. Юнко, ^{1,2}В. Мартинюк, ⁴В. Хома, ³Л. Гнатишина, ¹О. Михалюк, ¹В. Барановський,
¹М. Гладюк, ¹Г. Тулайдан, ³А. Мудра, ^{1*}О. Столяр

¹Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка, Україна

²Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

³Тернопільський національний медичний університет імені І.Я. Горбачевського, Україна

⁴Тернопільський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр, Україна

ЧУТЛИВА РЕАКЦІЯ ПРІСНОВОДНИХ МОЛЮСКІВ *UNIO TUMIDUS* НА ДІЮ СУМІШІ ПСИХОАКТИВНИХ РЕЧОВИН ТА МІКРОПЛАСТИКУ

Надходження психоактивних речовин у поверхневій воді зростає через їх широке застосування у лікуванні та підтриманні емоційного стану людини. Двостулкові молюски є чутливими організмами для оцінки забруднення води. Проте вплив сполук, які змінюють поведінку та когнітивні функції людини, на нецільові організми досліджений недостатньо. Крім того, присутність мікропластику у водному середовищі може змінювати його біологічний вплив. Тому, щоб наблизити експериментальні умови до реальних, метою цього дослідження було визначити, чи є біохімічні маркери стресу та токсичності у двостулкових молюсків відповідними для оцінки одноразового та комбінованого впливу психоактивних речовин і мікропластику.

Протягом 14 днів прісноводних молюсків *Unio tumidus* піддавали дії МР (1 мг л⁻¹, розмір 35-50 мкм), кофеїну (Caff, 110 пМ), хлорпромазину (Cpz, 37 пМ) або їх суміші (Mix). Оцінено набір біомаркерів токсичності та концентрації цинку (Zn) і міді (Cu) у травній залозі.

Усі впливи викликали ознаки токсичності, що виражалися як втрата стабільності лізосомальної мембрани, інактивація холінерастери та зниження співвідношення Zn/Cu. Усі впливи, особливо МР, підвищували рівень глутатіону, що вказує на залучення клітинних тіолів низької ваги у відповідь на стрес. Вплив МР індукував супероксиддисмутазу, а суміш знижувала активність фенолоксидази, підтверджуючи негативний кумулятивний ефект комбінованого впливу. Рекомендуємо використовувати зниження співвідношення Zn/Cu в молюсках як оптимальний показник для оцінки порушень в екосистемі, а також оцінювати активність фенолоксидази для виявлення комбінованого впливу стресових факторів.

Ключові слова: фармацевтики, антиоксидантні ензими, мідь, цинк, кумулятивний ефект.

Надійшла 06.12.2024.

ГІДРОБІОЛОГІЯ

УДК 582.261/.279

doi: 10.25128/2078-2357.24.3–4.5

В. І. ЩЕРБАК, Н. Є. СЕМЕНЮК, О. А. ДАВИДОВ, Е. Ш. КОЗІЙЧУК

Інститут гідробіології НАН України
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210
e-mail: ek424nata@ukr.net

ДОМІНУЮЧІ КОМПЛЕКСИ ВИДІВ У МЕТАУГРУПОВАННЯХ ВОДОРОСТЕЙ ПЛАНКТОНУ, БЕНТОСУ, ПЕРИФІТОНУ^{1,2}

Розроблено системний методичний підхід до виділення домінуючих комплексів видів у метаугрупованнях водоростей та проведено його апробацію при комплексному вивченні планктону, бентосу, перифітону різнотипних лотичних і лентичних континентальних екосистем. Основними складовими запропонованого підходу є виділення домінуючого комплексу як за чисельністю, так і за біомасою; використання не абсолютних, а відносних кількісних показників домінуючих видів; застосування градації вид-домінант і вид-субдомінант; аналіз просторової динаміки домінуючих комплексів в аспекті метаугруповань у тримірному просторі. Встановлено, що домінуючі комплекси альгометаугруповань можуть бути представлені монодомінуванням Bacillariophyta, олігодомінантним комплексом Bacillariophyta–Cyanobacteria, Bacillariophyta–Chlorophyta чи полідомінантними Bacillariophyta–Cyanobacteria–Chlorophyta. Показано, що присутність планктонних форм Cyanobacteria у контурних угрупованнях зумовлена явищем мас-ефекту – осіданням видів з товщі води, де їхня чисельність є високою, у нетипові для цих видів локалітети – на дно та тверді субстрати. Також має місце зворотний процес – перехід видів з дна та субстратів у водну товщу.

Ключові слова: домінуючий комплекс, домінанти, субдомінанти, метаугруповання, фітопланктон, мікрофітобентос, фітоперифітон, чисельність, біомаса.

Загальновідомо, що водорості планктону, бентосу, перифітону континентальних лотичних і лентичних екосистем характеризуються високим таксономічним різноманіттям на різних шаблях систематичної ієрархії, а також значними величинами чисельності та біомаси. З огляду на це, важливим аспектом застосування теорії метаугруповань у гідробіології є оцінка ролі водоростей в основних процесах, що визначають структурно-функціональну організацію біорізноманіття: у потоках енергії, колообігу речовин, евтрофуванні, формуванні якості води тощо.

Показано [2, 5, 13, 14, 15, 18, 19, 22, 23 та інші], що основна роль у цих процесах належить домінуючим видам водоростей. Крім того, у різних літературних джерелах вживають

¹ При описі метаугруповань водоростей у лотичних екосистемах частково були використані матеріали, отримані згідно з програмою «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень (КПКВК 6541230)» (керівник – академік НАН України С. О. Афанасьєв).

² Автори висловлюють подяку д.б.н., проф. В. І. Юришинцю за наукові консультації під час написання роботи.

терміни: ядро видів, масові види, найчисленніші види, провідні види, характерні види чи види, що визначають властивості фітоценозу [1].

У ботанічній, зоологічній, гідробіологічній науках існують різні методичні підходи до визначення домінуючих видів.

Найбільш загальновідомим є енергетичний принцип [18], згідно з яким домінуючі види виділяються за їхньою відсотковою часткою в біомасі. Наприклад, Г. Д. Приймаченко [4] доведено, що біомаса видів-домінантів в сумі повинна складати до 80 % біомаси фітопланктону. Крім енергетичного принципу, існує метод К. Стармаха [25], відповідно до якого домінування оцінюється за часткою трапляння представників видів водоростей в полі зору мікроскопа.

Тому на сьогодні у контексті досліджень альгометагруповань актуальною є розробка системного підходу до виділення домінуючих комплексів видів водоростей.

Мета роботи – розробити системний методичний підхід до виділення домінуючих комплексів видів в альгометагрупованнях та провести його апробацію при комплексному вивченні планктону, бентосу, перифітону різнотипних лотичних і лентичних континентальних екосистем.

Матеріали та методи досліджень

Матеріалами роботи слугували:

1) Ретроспективні дані досліджень продукції домінуючих видів фітопланктону Київського водосховища [21] та більш узагальнені дані по Дніпровському каскаду [6, 20].

2) Результати сучасних досліджень:

– домінуючих комплексів фітопланктону низки різнотипних ставків м. Гостомель у 2021 р. [7, 8];

– різнотипних метагруповань водоростей планктону, бентосу, перифітону лотично-лентичної ділянки Канівського водосховища впродовж літніх сезонів 2017–2022 рр. [10, 11, 12];

– у якості прикладу типових лотичних гідроекосистем використані дані комплексних досліджень домінуючих видів в альгометагрупованнях (планктон, бентос, перифітон) верхньої ділянки транскордонної р. Західний Буг та 15 її допливів. Особливість цих робіт полягала в тому, що дослідження водоростей різнотипних локалітетів проводили в період літньо-осінньої межени 2018 р., коли гідрологічним характеристикам водотоків був властивий виражений стабільний режим [9].

Для розрахунку коефіцієнтів Серенсена, побудови дендрограм за методом «найближчого сусіда» [17, 24] використана комп'ютерна програма Past 4.03.

Результати досліджень та їх обговорення

У процесі вивчення швидкості формування первинної продукції на етапі стабілізації Київського водосховища [21] із 496 видів та внутрішньовидових таксонів (ввт) фітопланктону домінуючими за біомасою було виявлено 72 ввт.

Під час аналізу фітопланктону водосховищ Дніпровського каскаду з 1574 ввт було виділено 78 домінуючих видів за біомасою [20].

Важливо, що у виділенні домінуючих видів за енергетичним принципом має місце певний «парадокс». Він полягає в тому, що за домінування за чисельністю дрібноклітинних форм водоростей з Cyanobacteria, Chlorophyta, Ochrophyta, які характеризуються високою питомою продукцією (добовими Р/В-коефіцієнтами), їхня частка в біомасі є низькою і, як правило, «поступається» крупноклітинним менш продуктивним і численним формам з Bacillariophyta, Miozoa, Euglenozoa [6].

Подальший узагальнюючий аналіз багаторічних авторських даних показав, що для альгологічних досліджень найбільш інформативним і репрезентативним є системний методичний підхід до виділення видів-домінантів, алгоритм якого включає такі дії:

1) Паралельне виділення домінуючого комплексу (ДК) за чисельністю та біомасою. Це зумовлено тим, що незалежно від локалітету угруповання водоростей складаються з видів, які значно відрізняються за своїми цитоморфологічними та розмірними ознаками. Так, об'єми

клітин можуть коливатися від мінімальних – декілька мкм³ (наприклад, *Microcystis pulverea* (H.C.Wood) Forti, *Merismopedia minima* G.Beck) до максимальних – тисячі – десятки тисяч мкм³ (*Ceratium hirundinella* (O.F.Müller) Dujardin, *Pinnularia major* (Kützinger) Rabenhorst, *Surirella librile* (Ehrenberg) Ehrenberg).

2) Наведення структурних характеристик ДК не в абсолютних показниках (величини чисельності/біомаси), а у відносних (% від їхньої загальної кількості). Це зумовлено високою мінливістю кількісного розвитку водоростей (у межах декількох порядків) залежно від впливу абіотичних, біотичних, кліматичних, антропогенних чинників. Наприклад, за різних умов один і той самий вид у тому ж локалітеті може входити до ДК з чисельністю в декілька тисяч клітин і біомасою 0,001 мг або з чисельністю в декілька мільйонів клітин і значною біомасою (більше 1 мг).

3) Визначення як домінантів (Д) – від 10 % чисельності/біомаси і вище), так і субдомінантів (С) – 5,0–9,9 % відповідно. Необхідність такої градації зумовлена тим, що за різних фаз розвитку (лог-; лаг-; стабільна) кількісне представлення виду впродовж вегетаційного сезону може значно змінюватись. Це співпадає з літературними даними [3], коли в літньому фітопланктоні Київського водосховища 75 % загальної кількості видів мають частоту трапляння до 20 %.

4) Введення градації а) вид-домінант, б) вид-субдомінант зумовлено й тим, що в конкретній гідроекосистемі його категорія може змінюватись не тільки в часі, а і в тримірному просторі – під час переходу з одного локального угруповання в інше та в зворотному напрямку: «планктон↔бентос», «планктон↔перифітон», «перифітон↔бентос» [11];

5) Запропонований системний методичний підхід має уніфіковане застосування:

а) при дослідженні альгометаугруповань планктону, бентосу і перифітону;

б) рівною мірою в лентичних і лотичних континентальних екосистемах.

Для ілюстрації запропонованого системного підходу виділення ДК при дослідженні альгометаугруповань наведено декілька прикладів.

Лентичні екосистеми. Типовими лентичними екосистемами є низка ставків міста-героя Гостомеля (Київська обл., Бучанський р-н). У ході дослідження таксономічного різноманіття фітопланктону ставків ідентифіковано 136 видових таксонів з восьми систематичних відділів [7]. ДК за чисельністю складався з 12 видів, з яких домінантами (Д) були 8, в основному дрібноклітинні форми з *Cyanobacteria*, найбільш масові – *Microcystis pulverea* (12–79 %); *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault (31–45 %) від загальної чисельності. Субдомінантів (С) було два види, водночас виявлено два види водоростей, які входили до складу ДК у якості Д чи С [8].

За біомасою ДК формували 16 таксонів, з яких Д було чотири крупноклітинні форми, наприклад *Peridinium cinctum* (O.F.Müller) Ehrenberg – до 60–75 %; *Phacus longicauda* (Ehrenberg) Dujardin – до 50 % від сумарної біомаси. У якості С було визначено 9, а до числа видів, що змінювали своє значення домінант↔субдомінант, належало 3 види. Розрахований коефіцієнт Серенсена для ДК за чисельністю та біомасою становив 0,22, що вказує на те, що за чисельністю домінують переважно дрібноклітинні форми, а за біомасою – крупноклітинні. Тому більш репрезентативні дані можна отримати за застосування системного підходу до виділення ДК.

Лотично-лентична екосистема. Прикладом регіону, який містить різнотипні локалітети лотичних і лентичних складових екосистеми, може слугувати Канівське водосховище.

Результати комплексних досліджень впродовж літніх сезонів 2017–2022 р. показали, що видове різноманіття фітопланктону, мікрофітобентосу, фітоепіфітону представлене 311 видовими таксонами [10]. Виділений ДК як за чисельністю, так і за біомасою налічував 76 видів [11]. За систематичною ієрархією домінанти та субдомінанти визначалися *Cyanobacteria*–*Bacillariophyta*–*Chlorophyta* комплексом, що є характерним для більшості альгометаугруповань континентальних водойм і водотоків як в Україні, так і країнах ЄС. Кількість представників *Miozoa*, *Ochrophyta*, *Charophyta* була мізерною і становила 1–2 види Д чи С.

Аналіз видової та кількісної структурної організації ДК локальних угруповань показав наявність лише 9 видів, які є спільними домінантами в досліджуваних метаугрупованнях як за чисельністю, так і біомасою. Серед них найбільшими показниками розвитку вирізнялись *Microcystis wesenbergii* (Komárek) Komárek ex Komárek, *Anagnostidinium amphibium* (Gomont) Strunecký, Bohunická, J.R.Johansen & Komárek, *Oscillatoria tenuis* C.Agardh ex Gomont, *Staurosira binodis* (Ehrenberg) Lange-Bertalot та інші.

Численнішими були види, які належали тільки до С, зокрема: *Aulacoseira distans* (Ehrenberg) Simonsen, *Cymbella lanceolata* C.Agardh, *Amphora libyca* Ehrenberg, *A. ovalis* (Kützing) Kützing, тощо.

Найбільшою кількістю представлені види, які залежно від екологічних умов у кожному зі ставів входять до складу ДК як Д чи як С. У якості типових представників виступали *Aphanizomenon flos-aquae*, *Coelosphaerium kuetzingianum* Nägeli, *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing, *M. pulvereae*, *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* (O.Müller) Simonsen, *Stephanodiscus hantzschii* Grunow, *Pediastrum duplex* Meyen та ін. У цілому повний список видів-домінантів і субдомінантів в планктоні та контурних угрупованнях (бентос, обростання) наведено в «Додаткових матеріалах» до цитованої публікації [12].

Запропоноване методом експертної оцінки ранжування видів з Д і С за частотою трапляння (%) в ДК планктонних і контурних альгометаугруповань дозволило виділити чотири класи (табл. 1).

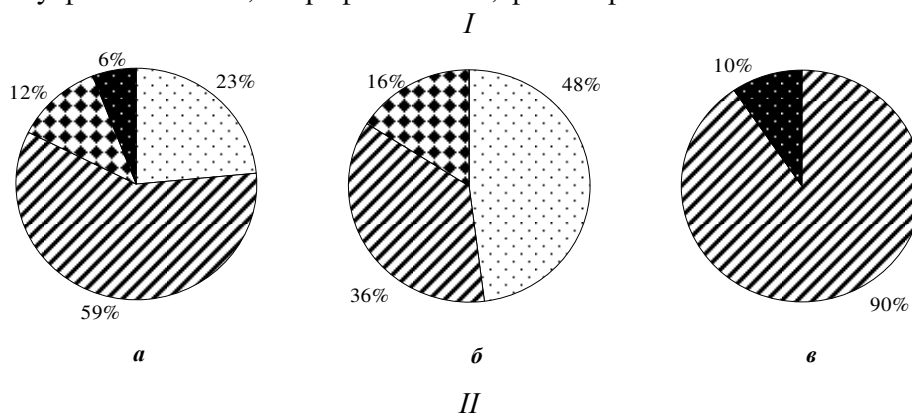
Таблиця 1

Ранжування домінантів і субдомінантів за частотою трапляння (%) в ДК планктонних та контурних альгометаугруповань лотичних і лентичних локалітетів Канівського водосховища в літні сезони 2017–2022 рр. [11]

№ п/п	Клас	Частота трапляння (%) ¹
1.	I	1–9,9
2.	II	10–29,9
3.	III	30–49,9
4.	IV	50>

Примітка. 1 – частота трапляння (%) у пробах водоростей.

Для більшої наочності на рис. 1 наведено і розподіл класів ДК за частотою домінування у фітопланктоні, мікрофітобентосі, фітоепіфітоні.



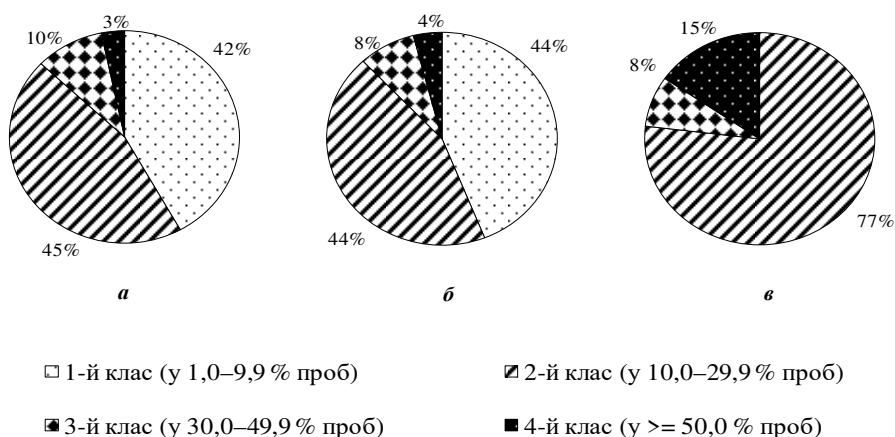


Рис. 1. Розподіл видів за класами частоти домінування за чисельністю (*I*) та біомасою (*II*) у метагрупуваннях фітопланктону (*a*), мікрофітобентосу (*б*) і фітоепіфітону (*в*) Канівського водосховища у літній період 2017–2022 рр. Відсотки біля кругових діаграм позначають частку видів-домінантів, які належать до відповідного класу [11].

Отже, для фітопланктону та мікрофітобентосу найбільшу кількість становлять види *D* та *C* з 1-го і 2-го класів, а у фітоепіфітоні – з 2-го класу.

Вважаємо за доцільне для підтвердження необхідності виділення ДК різнотипних альгометагрупувань як за чисельністю, так і біомасою, розрахувати коефіцієнт Серенсена та методом кластерного аналізу побудувати дендрограму. Отримана дендрограма розділилася на три кластери (рис. 2).

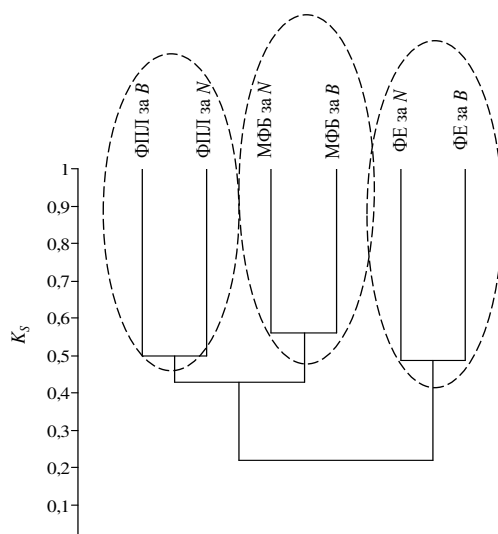


Рис. 2. Дендрограма подібності домінуючих комплексів в метагрупуваннях фітопланктону (ФПЛ), мікрофітобентосу (МФБ) та фітоепіфітону (ФЕ) Канівського водосховища за чисельністю (*N*) і біомасою (*B*) відповідно до коефіцієнту Серенсена (K_S) [11].

Наведені дані вказують на значні відмінності в структурі ДК фітопланктону, мікрофітобентосу та фітоепіфітону. Відповідно, у межах кожного кластеру відбувається розділення на ДК за біомасою та чисельністю.

Відповідно до цього, заслуговують на увагу результати порівняння ДК за чисельністю та біомасою планктону, бентосу, перифітону лотичних і лентичних локалітетів Канівського водосховища (табл. 2).

Порівняння домінуючих комплексів видів (за N та B) в різнотипних альгометагрупуваннях на лотичних і лентичних ділянках Канівського водосховища

Метагрупування водоростей	Кількість видів у ДК		Кількість спільних видів у ДК лотичних і лентичних ділянок	K_S (лотичні ділянки / лентичні ділянки)
	лотичні ділянки	лентичні ділянки		
ДК за N				
Фітопланктон	13	10	6	0,52
Мікрофітобентос	16	17	8	0,48
Фітоепіфітон	13	13	5	0,38
ДК за B				
Фітопланктон	26	15	10	0,49
Мікрофітобентос	17	18	10	0,57
Фітоепіфітон	7	9	4	0,50

Примітка. ДК – домінуючий комплекс; за N – за чисельністю; за B – за біомасою; K_S – коефіцієнт Серенсена, що відображає ступінь подібності між угрупованнями водоростей лотичних і лентичних ділянок.

Одержані величини коефіцієнта Серенсена чітко показують, що ДК за чисельністю та біомасою притаманні певні відмінності, що засвідчує необхідність виділення ДК як за чисельністю, так за і біомасою для отримання більш репрезентативних даних.

До прикладу, якщо ДК виділені лише за чисельністю чи лише біомасою, вони не можуть повною мірою характеризувати видове та кількісне різноманіття угруповань водоростей. Це особливо важливо враховувати за дослідження великих лентичних та лотично-лентичних континентальних гідроекосистем (таких як озера, водосховища, естуарії).

Не менш важливим є і дослідження ДК лотичних екосистем.

Лотичні екосистеми. У лотичних гідроекосистемах, до яких належать верхня ділянка транскордонної р. Західний Буг та п'ятнадцять досліджених допливів в період літньо-осінньої межени 2018 р., у планктонних і контурних метагрупуваннях було ідентифіковано 318 видових таксонів водоростей [9]. Виділений ДК був представлений 97 видовими таксонами D та/або C . Його склад формували Bacillariophyta – 52 (54 %), Cyanobacteria – 26 (27 %) та Chlorophyta – 14 (14 %) видових таксонів відповідно. Представників з Ochrophyta, Cryptista, Charophyta було значно менше – їхня частка не перевищувала 1–7 % в загальному ДК.

Для оцінки подібності ДК водоростей альгометагрупувань планктону, бентосу, перифітону р. Західний Буг (з допливами) за коефіцієнтом Серенсена проведено кластерний аналіз [17] та побудовано дендрограму, яка наведена на рис. 3.

Отримана дендрограма розділяється на кластери та фактично відображає просторову динаміку альгометагрупувань у тримірному просторі. Подібність ДК, виділених окремо за чисельністю чи біомасою, є досить високою і складає $K_S > 0,50$. Величина K_S між різнотипними альгометагрупуваннями є значно нижчою ($K_S < 0,50$), що вказує на просторову диференціацію домінуючих комплексів видів. Важливо відзначити, що аналогічний порядок ранжирування коефіцієнтів Серенсена відмічено раніше для планктону та контурних угруповань Канівського водосховища [11].

Хоча р. Західний Буг та її допливи є типовими лотичними гідроекосистемами, але структурна організація ДК видів у їхньому фітопланктоні дещо відрізняється. Так, ДК у річці за чисельністю та біомасою формувався з 12 видів і в основному був представлений монодомінантним комплексом Bacillariophyta.

На відміну від річки, ДК у допливах за чисельністю складався з 37 видів, за біомасою – 38 видів і формувався полідомінантним комплексом Bacillariophyta–Chlorophyta–Cyanobacteria.

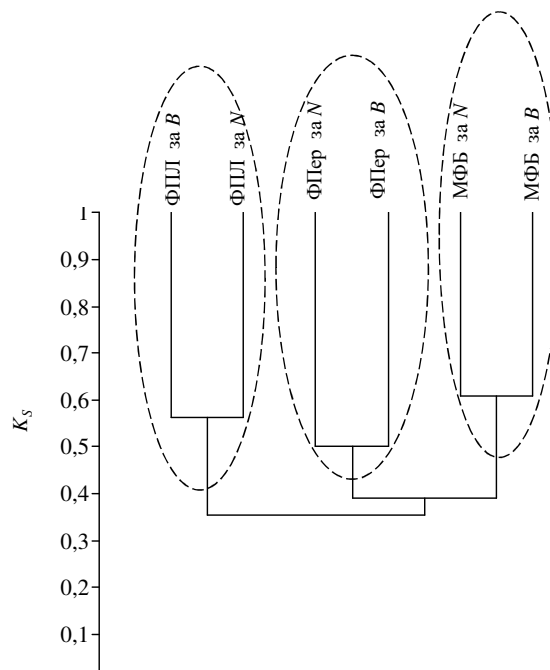


Рис. 3. Дендродіаграма подібності домінуючих комплексів видів у метагрупуваннях фітопланктону (ФПЛ), мікрофітобентосу (МФБ) та фітоперифітону (ФПер) р. Західний Буг та її допливів за чисельністю (N) і біомасою (B) відповідно до коефіцієнту Серенсена (K_s).

У метагрупуваннях мікрофітобентосу річки та допливів, виділених за чисельністю чи біомасою, переважали Bacillariophyta, зокрема, це *Amphora ovalis*, *Stephanocyclus meneghinianus* (Kützing) Kulikovskiy, Genkal & Kociolek, *Gomphonella olivacea* (Hornemann) Rabenhorst, *Gyrosigma acuminatum* (Kützing) Rabenhorst, *Meridion circulare* (Greville) C. Agardh та інші, в основному пенатні форми, у яких відсутні виражені морфологічні утворення для існування у товщі води. Також показано [21], що Bacillariophyta відносяться до «тіньюлюбних форм», а, отже, на дні водотоків у літньо-осінню межень формуються локалітети, що забезпечують їхню життєдіяльність.

У цілому, ДК у бентосних альгометагрупуваннях річки та допливів за біомасою визначається монокомплексом Bacillariophyta. Його провідна роль залишається і за чисельністю, але в якості субдомінантів, особливо в допливах, виступають Cyanobacteria та Chlorophyta.

У метагрупуваннях фітоперифітону за біомасою домінували Bacillariophyta, що зазвичай було зумовлено тими ж чинниками, що й для мікрофітобентосу. У той же час структура ДК, виділеного за чисельністю, у річці та допливах у період проведення натурних досліджень, що також відповідає «біологічному літу», формувалась олігодомінантним комплексом Bacillariophyta–Cyanobacteria. Присутність останніх в метагрупуваннях фітообростань пов'язана з явищем мас-ефекту [16] – переходом видів з товщі води в нетиповий для цих видів локалітет – на тверді субстрати.

Важливо, що це явище раніше було зафіксовано для фітоепіфітону лентичної екосистеми – Канівського водосховища [5, 26]. Вважаємо, що встановлені відмінності в структурній організації ДК є адаптивною здатністю водоростей у системі «планктон ↔ контурні метагрупування» вегетувати в різноманітних локалітетах лотичних гідроекосистем.

Висновки

Структурна організація домінуючого комплексу є важливим аспектом застосування теорії метагрупувань у дослідженні водоростей різних екологічних груп. З огляду на це, запропоновано системний підхід до виділення домінуючих видів у водоростевих

метагрупуваннях та проведено його апробацію при комплексному вивченні фітопланктону, мікрофітобентосу, фітоперифітону різнотипних лотичних і лентичних гідроекосистем. Зокрема, це:

- виділення домінуючого комплексу як за чисельністю, так і за біомасою, що дозволяє отримати більш репрезентативні дані;
- використання не абсолютних кількісних показників домінуючих видів (чисельність, біомаса), а їхньої відсоткової частки від загальної чисельності/біомаси;
- застосування градації вид-домінант і вид-субдомінант;
- аналіз просторової динаміки домінуючих комплексів в аспекті метагрупувань у тримірному просторі.

Встановлено, що ДК різних альгометагрупувань можуть бути представлені монодомінуванням Bacillariophyta, олігодомінантними комплексом Bacillariophyta–Cyanobacteria, Bacillariophyta–Chlorophyta, чи полідомінантними Bacillariophyta–Cyanobacteria–Chlorophyta.

Присутність планктонних форм Cyanobacteria у фітоперифітоні зумовлена явищем мас-ефекту – переходом видів з товщі води, де їхня чисельність є високою, у нетиповий для цих видів локалітет – на тверді субстрати. Також має місце зворотний процес – перехід видів з поверхні субстратів у водну товщу. Це черговий раз підкреслює єдність автотрофної ланки водних екосистем.

Таким чином, вивчення структурної організації домінуючих комплексів, з урахуванням видів-домінантів, домінантів ↔ субдомінантів і субдомінантів планктонних та контурних альгометагрупувань за чисельністю чи біомасою, є важливим складником гідробіологічних досліджень у лотичних і лентичних континентальних екосистемах України.

1. *Біологічний словник* / за ред. К. М. Ситника, В. О. Топачевського. Київ : УРЕ, 1986. 680 с.
2. Давидов О. А. Структурні компоненти мікрофітобентосу як індикатори впливу антропогенних чинників на водні об'єкти. *Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту ім. Володимира Гнатюка. Серія: Біологія*. 2009. Т. 3, № 40. С. 47–56.
3. Майстрова Н. В. Різноманітність фітопланктону Київського водосховища. *Український ботанічний журнал*. 2009. Т. 66, № 2. С. 220–233.
4. Приймаченко А. Д. *Фітопланктон и первичная продукция Днепра и днепровских водохранилищ*. Київ : Наук. думка, 1981. 228 с.
5. Семенюк Н. Є. *Фітоепіфитон водних об'єктів басейну Дніпра*: автореф. дис. ... д-ра біол. наук. Київ, 2020. 40 с.
6. Щербак В. И. Продукционные характеристики доминирующих видов фитопланктона днепровских водохранилищ. *Альгология*. 1998. Т. 8, № 3. С. 286–294.
7. Щербак В. І., Семенюк Н. Є. Структурно-функціональна характеристика фітопланктону, дерновин-подушок, детриту і якості води за основних абіотичних чинників ставів міської агломерації (смт Гостомель, Бучанський р-н Київської обл., Україна). Повідомлення І. Видове, таксономічне, екологічне різноманіття фітопланктону та характеристика дерновин-подушок за основних абіотичних складових ставків. *Альгология*. 2023. Т. 33, № 1. С. 22–47. <https://doi.org/10.15407/alg33.01.022>.
8. Щербак В. І., Семенюк Н. Є. Структурно-функціональна характеристика фітопланктону, дерновин-подушок, детриту і якості води за основних абіотичних чинників ставів міської агломерації (смт Гостомель, Бучанський р-н Київської обл., Україна). Повідомлення ІІ. Кількісні показники, домінуючі комплекси фітопланктону, детрит та якість води міських ставів. *Альгология*. 2023. Т. 33, № 2. С. 65–82. <https://doi.org/10.15407/alg33.02.065>.
9. Щербак В. І., Семенюк Н. Є., Давидов О. А., Козійчук Е. Ш. Планктонні та контурні угруповання водоростей української ділянки р. Західний Буг та її допливів. Повідомлення І. Абіотичні складові, таксономічна й екологічна характеристики та флористичні особливості фітопланктону, мікрофітобентосу, фітоперифітону. *Альгология*. 2024. Т. 34, № 2. С. 130–159. <https://doi.org/10.15407/alg34.02.130>.
10. Щербак В. І., Семенюк Н. Є., Давидов О. А., Ларіонова Д. П. Сучасна характеристика фітопланктону, мікрофітобентосу та фітоепіфітону Канівського водосховища. Повідомлення І: Таксономічне, екологічне різноманіття та просторовий розподіл. *Альгология*. 2023. Т. 33, № 3. С. 147–184. <https://doi.org/10.15407/alg33.03.147>.

11. Щербак В. І., Семенюк Н. Є., Давидов О. А., Ларіонова Д. П. Сучасна характеристика фітопланктону, мікрофітобентосу та фітоепіфітону Канівського водосховища. Повідомлення 2: Абіотичні чинники, кількісне різноманіття, домінуючий комплекс, трофність та оцінка якості водного середовища. *Альгологія*. 2023. Т. 33, № 4. С. 247–277. <https://doi.org/10.15407/alg33.04.247>.
12. Щербак В. І., Семенюк Н. Є., Давидов О. А., Ларіонова Д. П. Таблиця 3. Список домінантів (Д) та субдомінантів (С) фітопланктону, мікрофітобентосу і фітоепіфітону Канівського водосховища за чисельністю (N) та біомасою (B) у біотопах у літні періоди 2017–2022 рр. Додаткові матеріали до статті: Сучасна характеристика фітопланктону, мікрофітобентосу та фітоепіфітону Канівського водосховища. Повідомлення 2: Абіотичні чинники, кількісне різноманіття, домінуючий комплекс, трофність та оцінка якості водного середовища. *Альгологія*. 2023. Т. 33, № 4. С. 247–277. URL: <https://algologia.co.ua/journal/article/view/33.4.247/75> (дата звернення: 17.07.2024).
13. Amano Y., Machida M. Mechanisms of algal species dominance among cyanobacteria, diatoms and green algae as a consequence of phosphorus reduction caused by river water dilution in eutrophic lake. *Journal of Water and Environment Technology*. 2013. Vol. 11, Issue 5. P. 391–401. <http://doi.org/10.2965/jwet.2013.391>.
14. Bruno J. F., Lee S. C., Kertesz J. S., Carpenter R. C., Long Z. T., Duffy J. E. Partitioning the effects of algal species identity and richness on benthic marine primary production. *Oikos*. 2006. Vol. 115. P. 170–178. <http://doi.org/10.1111/j.2006.0030-1299.14927.x>.
15. Iacarella J. C., Baroow J. L., Giani A., Beisner B. E., Gregory-Eaves I. Shifts in algal dominance in freshwater experimental ponds across differing levels of macrophytes and nutrients. *Ecosphere*. 2018. Vol. 9, Issue 1. e02086. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2086>.
16. Jamoneau A., Passy S. I., Soininen J., Leboucher T., Tison-Rosebery J. Beta diversity of diatom species and ecological guilds: Response to environmental and spatial mechanisms along the stream watercourse. *Freshwater Biology*. 2018. Vol. 63. P. 62–73. <https://doi.org/10.1111/fwb.12980>.
17. Larose D. T., Larose C. D. Hierarchical and *k*-mean clustering. In: *Data mining and predictive analytics*. John Wiley & Sons, Inc., 2015. P. 523–530.
18. Odum E. P. *Fundamentals of ecology*. Philadelphia : Saunders Co, 1953. 384 p.
19. Reynolds C. S. Algae. In: *River Biota. Diversity and Dynamics*. Oxford : Black. Sci., 1996. P. 6–26.
20. Shcherbak V. I. Photosynthetic activity of dominant species of the Dnieper River phytoplankton. *Hydrobiological Journal*. 2000. Vol. 36, Issue 2. P. 71–84. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v36.i2.60>.
21. Shcherbak V. I., Kuzmenko M. I. Intensity of photosynthesis by phytoplankton at various depths in the photic zone. *Hydrobiological Journal*. 1987. Vol. 23, Issue 2. P. 20–23.
22. Shcherbak V. I., Semeniuk N. Ye., Lutsenko D. A. Diveristy and ecological characteristics of algae in the water column in the subbasin of the large Danube lakes during the autumn-winter period (Ukraine). *International Journal on Algae*. 2023. Vol. 25, Issue 1. P. 71–94. <http://doi.org/10.1615/InterJAlgae.v25.i1.50>.
23. Shcherbak V., Sherman I., Semeniuk N., Kutishchev P. Autotrophic communities' diversity in natural and artificial water-bodies of a river estuary – A case-study of the Dnieper–Bug Estuary, Ukraine. *Ecohydrology and Hydrobiology*. Vol. 20. P. 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2019.07.001>.
24. Sørensen T. A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content and its application to analyses of the vegetation of Danish commons. *Kongelige Danske Videnskabernes Selskab Biologiske Skrifter*. 1948. Vol. 5, Issue 4. 1–46.
25. Starmach K. *Metody badania planktonu*. Warszawa: PWN, 1955. 135 s.
26. Zadorozhna H., Semeniuk N., Shcherbak V. Interaction between phytoplankton and epiphytic algae in the Kaniv Water Reservoir (Ukraine). *International Letters of Natural Sciences*. 2017. Vol. 61. P. 56–68. <https://doi.org/10.18052/www.scipress.com/ILNS.61.56>.

References

1. *Bioloichnyi slovnyk* / za red. K. M. Sytnyka, V. O. Topachevskoho. Kyiv : URE, 1986. 680 s. [in Ukrainian]
2. Davydov O. A. Strukturni komponenty mikrofitobentosa iak indykatory vplyvu antropohennykh chynnykiv na vodni obiekty. *Nauk. zap. Ternop. nats. ped. un-tu im. Volodymyra Hnatiuka. Serii: Biolohiia*. 2009. T. 3, No 40. S. 47–56. [in Ukrainian]
3. Maistrova N. V. Rizmomanitnist fitoplanktonu Kyivskoho vodoskhovyshcha. *Ukrainskyi botanichnyi zhurnal*. 2009. T. 66, No 2. S. 220–233. [in Ukrainian]
4. Pryymachenko A. D. *Fytoplankton y pervychnaia produktsiya Dnepra y dneprovskykh vodokhranylyshch*. Kyev : Nauk. dumka, 1981. 228 s. [in Russian]

5. Semeniuk N. Ie. *Fitoepifiton vodnykh ob'ektiv baseinu Dnipra*: avtoref. dys. ... d-ra biol. nauk. Kyiv, 2020. 40 s. [in Ukrainian]
6. Shcherbak V. I. Produktsionnie kharakteristiki dominiruiushchikh vidov fitoplanktona dneprovskikh vodokhranilishch. *Algologiya*. 1998. T. 8, No 3. S. 286–294. [in Russian]
7. Shcherbak V. I., Semeniuk N. Ie. Strukturno-funktsionalna kharakterystyka fitoplanktonu, dervynypodushok, detrytu i iakist vody za osnovnykh abiotychnykh chynnykiv staviv miskoi ahlomeratsii (smt Hostomel, Buchanskyi r-n Kyivskoi obl., Ukraina). Povidomlennia I. Vydove, taksonomichne, ekolohichne riznomanittia fitoplanktonu ta kharakterystyka dervynypodushok za osnovnykh abiotychnykh skladovykh stavkiv. *Alholohiia*. 2023. T. 33, No 1. S. 22–47. <https://doi.org/10.15407/alg33.01.022>. [in Ukrainian]
8. Shcherbak V. I., Semeniuk N. Ie. Strukturno-funktsionalna kharakterystyka fitoplanktonu, dervynypodushok, detrytu i iakist vody za osnovnykh abiotychnykh chynnykiv staviv miskoi ahlomeratsii (smt Hostomel, Buchanskyi r-n Kyivskoi obl., Ukraina). Povidomlennia II. Kilkisni pokaznyky, dominuiuchi kompleksy fitoplanktonu, detryt ta iakist vody miskykh staviv. *Alholohiia*. 2023. T. 33, No 2. S. 65–82. <https://doi.org/10.15407/alg33.02.065>. [in Ukrainian]
9. Shcherbak V. I., Semeniuk N. Ie., Davydov O. A., Koziychuk E. Sh. Planktonni ta konturni uhrupovannia vodorosteï ukrainskoi dilianky r. Zakhidnyi Buh ta ii doplyviv. Povidomlennia 1. Abiotychni skladovi, taksonomichna i ekolohichna kharakterystyka ta florystychni osoblyvosti fitoplanktonu, mikrofitobentosu, fitoperyfitonu. *Alholohiia*. 2024. T. 34, No 2. S. 130–159. <https://doi.org/10.15407/alg34.02.130>. [in Ukrainian]
10. Shcherbak V. I., Semeniuk N. Ie., Davydov O. A., Larionova D. P. Suchasna kharakterystyka fitoplanktonu, mikrofitobentosu ta fitoepifitonu Kanivskoho vodoskhovyshcha. Povidomlennia 1: Taksonomichne, ekolohichne riznomanittia ta prostorovyi rozpodil. *Alholohiia*. 2023. T. 33, No 3. S. 147–184. <https://doi.org/10.15407/alg33.03.147>. [in Ukrainian]
11. Shcherbak V. I., Semeniuk N. Ie., Davydov O. A., Larionova D. P. Suchasna kharakterystyka fitoplanktonu, mikrofitobentosu ta fitoepifitonu Kanivskoho vodoskhovyshcha. Povidomlennia 2: Abiotychni chynnyky, kilkisne riznomanittia, dominuiuchy kompleks, trofnist ta otsinka yakosti vodnoho seredovyshcha. *Alholohiia*. 2023. T. 33, No 4. S. 247–277. <https://doi.org/10.15407/alg33.04.247>. [in Ukrainian]
12. Shcherbak V. I., Semeniuk N. Ie., Davydov O. A., Larionova D. P. Tablytsia 3. Spysok dominantiv (D) ta subdominantiv (S) fitoplanktonu, mikrofitobentosu i fitoepifitonu Kanivskoho vodoskhovyshcha za chyselnistiu (N) ta biomasoiu (B) u biotopakh u litni periody 2017–2022 rr. Dodatkovi materialy do statti: Suchasna kharakterystyka fitoplanktonu, mikrofitobentosu ta fitoepifitonu Kanivskoho vodoskhovyshcha. Povidomlennia 2: Abiotychni chynnyky, kilkisne riznomanittia, dominuiuchy kompleks, trofnist ta otsinka yakosti vodnoho seredovyshcha. *Alholohiia*. 2023. T. 33, No 4. S. 247–277. URL: <https://algologia.co.ua/journal/article/view/33.4.247/75> (last accessed: 17.07.2024). [in Ukrainian]
13. Amano Y., Machida M. Mechanisms of algal species dominance among cyanobacteria, diatoms and green algae as a consequence of phosphorus reduction caused by river water dilution in eutrophic lake. *Journal of Water and Environment Technology*. 2013. Vol. 11, Issue 5. P. 391–401. <http://doi.org/10.2965/jwet.2013.391>.
14. Bruno J. F., Lee S. C., Kertesz J. S., Carpenter R. C., Long Z. T., Duffy J. E. Partitioning the effects of algal species identity and richness on benthic marine primary production. *Oikos*. 2006. Vol. 115. P. 170–178. <http://doi.org/10.1111/j.2006.0030-1299.14927.x>.
15. Iacarella J. C., Baroow J. L., Giani A., Beisner B. E., Gregory-Eaves I. Shifts in algal dominance in freshwater experimental ponds across differing levels of macrophytes and nutrients. *Ecosphere*. 2018. Vol. 9, Issue 1. e02086. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2086>.
16. Jamoneau A., Passy S. I., Soininen J., Lebourcier T., Tison-Rosebery J. Beta diversity of diatom species and ecological guilds: Response to environmental and spatial mechanisms along the stream watercourse. *Freshwater Biology*. 2018. Vol. 63. P. 62–73. <https://doi.org/10.1111/fwb.12980>.
17. Larose D. T., Larose C. D. Hierarchical and *k*-mean clustering. In: *Data mining and predictive analytics*. John Wiley & Sons, Inc., 2015. P. 523–530.
18. Odum E. P. *Fundamentals of ecology*. Philadelphia : Saunders Co, 1953. 384 p.
19. Reynolds C. S. Algae. In: *River Biota. Diversity and Dynamics*. Oxford : Black. Sci., 1996. P. 6–26.
20. Shcherbak V. I. Photosynthetic activity of dominant species of the Dnieper River phytoplankton. *Hydrobiological Journal*. 2000. Vol. 36, Issue 2. P. 71–84. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v36.i2.60>.
21. Shcherbak V. I., Kuzmenko M. I. Intensity of photosynthesis by phytoplankton at various depths in the photic zone. *Hydrobiological Journal*. 1987. Vol. 23, Issue 2. P. 20–23.
22. Shcherbak V. I., Semeniuk N. Ye., Lutsenko D. A. Diveristy and ecological characteristics of algae in the water column in the subbasin of the large Danube lakes during the autumn-winter period (Ukraine). *International Journal on Algae*. 2023. Vol. 25, Issue 1. P. 71–94. <http://doi.org/10.1615/InterJAlgae.v25.i1.50>.

23. Shcherbak V., Sherman I., Semeniuk N., Kutishchev P. Autotrophic communities' diversity in natural and artificial water-bodies of a river estuary – A case-study of the Dnieper–Bug Estuary, Ukraine. *Ecohydrology and Hydrobiology*. Vol. 20. P. 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2019.07.001>.
24. Sørensen T. A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content and its application to analyses of the vegetation of Danish commons. *Kongelige Danske Videnskabernes Selskab Biologiske Skrifter*. 1948. Vol. 5, Issue 4. 1–46.
25. Starmach K. *Metody badania planktonu*. Warszawa: PWN, 1955. 135 s.
26. Zadorozhna H., Semeniuk N., Shcherbak V. Interaction between phytoplankton and epiphytic algae in the Kaniv Water Reservoir (Ukraine). *International Letters of Natural Sciences*. 2017. Vol. 61. P. 56–68. <https://doi.org/10.18052/www.scipress.com/ILNS.61.56>.

V. I. Shcherbak, N. Ye. Semeniuk, O. A. Davydov, E. Sh. Koziychuk
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

DOMINANT SPECIES COMPLEXES IN PLANKTONIC, BENTHIC AND PERIPHYTIC ALGAL METACOMMUNITIES

This paper proposes a systematic methodological approach to identifying dominant species complexes in algal metacommunities. The approach was applied during comprehensive studies of plankton, benthos, and periphyton in various lotic and lentic continental ecosystems. The algorithm of the proposed approach consists of the following steps:

- Selecting the dominant species complex based on both cell count and biomass, as algal communities comprise species that vary significantly in cell volume (ranging from a few cubic micrometers to several tens of thousands of cubic micrometers).
- Using relative abundance rather than absolute cell count or biomass to determine dominance, due to the high variability in algal abundance caused by abiotic, biotic, climatic, and anthropogenic factors.
- Differentiating between dominant species ($\geq 10\%$ of the total cell count or biomass) and subdominant species (5-9.9% of the total cell count or biomass).
- Analyzing the spatial dynamics of dominant species complexes within a metacommunity framework, considering their distribution and interactions across three-dimensional space - i.e., among phytoplankton, benthic, and periphytic algal communities.

The dominant species complexes in lotic and lentic ecosystems may be classified into:

- Monodominant complexes, primarily composed of Bacillariophyta.
- Oligodominant complexes, such as Bacillariophyta-Cyanobacteria and Bacillariophyta-Chlorophyta associations.
- Polydominant complexes, involving Bacillariophyta - Cyanobacteria -Chlorophyta assemblages.

The presence of planktonic Cyanobacteria in periphytic algal communities is attributed to the mass effect - a process in which species sediment from the water column, where they are abundant, onto an atypical habitat, such as hard substrata. Conversely, species may also transition from the substrata into the water column, further supporting the concept of a unified autotrophic network in aquatic ecosystems.

Thus, analyzing the structure of dominant species complexes - while accounting for dominant and subdominant species in planktonic and periphytic algal metacommunities - is a crucial aspect of hydrobiological research in lotic and lentic continental ecosystems of Ukraine.

Key words: dominant species complex, dominants, subdominants, metacommunities, phytoplankton, benthic algae, periphytic algae, cell count, biomass.

Надійшла 6.08.2024.

ЕКОЛОГІЯ

УДК 597.551.2:632.95

doi: 10.25128/2078-2357.24.3–4.6

О. І. ГОРИН, М. М. ГЛАДЧУК, О. І. БОДНАР

Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка
вул. М. Кривоноса, 2, Тернопіль, 46027
e-mail: horynoi@tnpu.edu.ua

ЕКОТОКСИКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ВПЛИВУ РЕАЛЬНИХ КОНЦЕНТРАЦІЙ МЕТАЛІВ МІЛІТАРНОГО ПОХОДЖЕННЯ НА ВОДНІ ОРГАНІЗМИ

У статті проведено екотоксикологічну оцінку впливу реальних концентрацій металів мілітарного походження (цинку (Zn), стронцію (Sr) і міді (Cu) та їх сумішей із літієм (Li), стибієм (Sb) і кадмієм (Cd)) на гідробіонтів на прикладі коропа (*Cyprinus carpio*) в умовах *in vitro*. Спостережено підвищення рівня перекисного окислення ліпідів за дії стронцію і цинку та окисних модифікацій протеїнів за дії міді, цинку та суміші металів, що вказує на посилення окисного стресу. Активність каталази і глутатіонтрансферази практично не залежали від типу металів, що свідчить про лабільність метаболізму та ефективні адаптаційні реакції організму на токсичний вплив. Зменшення рівня глутатіону за дії сумішей металів вказує на потенційне виснаження антиоксидантних резервів. Відмінності в активності каспази-3 дозволило оцінити апоптотичні процеси, а зміна активності ацетилхолінестерази у більшості варіантів досліджує свідчить про порушення передачі нервових імпульсів між нейронами за дії металів як окремо, так і у суміші.

Отримані дані є важливими для розуміння впливу військових забруднень на водні екосистеми та можуть бути використані для розробки екологічних нормативів і стратегій зменшення наслідків забруднення металами.

Ключові слова: гідробіонти, токсичність, метали, мілітарне забруднення.

Збройні конфлікти та військова діяльність призводять не лише до руйнувань інфраструктури та втрат людських життів, але й мають довготривалий вплив на навколишнє середовище [17, 22]. У лютому 2014 року росія розпочала агресію проти України, яка у 2022 році переросла у повномасштабне вторгнення, що триває й досі. Внаслідок бойових дій українська територія зазнала забруднення через залишки військової техніки, використані боєприпаси та вибухові речовини, що змінюють склад ґрунтів і водойм екосистем, завдаючи шкоди біорізноманіттю та знижуючи біопродуктивність екосистем [10, 25].

Відомо, що розпад матеріалів військового походження сприяє потраплянню важких металів та їхніх сполук у навколишнє середовище, зокрема у водні екосистеми [5, 24]. Однак кількості цих металів у водоймах, особливо в умовах збройних конфліктів, залишаються недостатньо вивченими [8]. З огляду на зазначене, з літературних джерел було зібрано дані про концентрації металів у водоймах, що могли зазнати впливу військової діяльності. Навіть у випадку, коли водойми не постраждали безпосередньо від бойових дій, відсутність належного контролю через близькість території до останніх може призвести до збільшення концентрацій небезпечних сполук.

Метали, що досліджувалися у цій роботі, були вибрані з урахуванням їх потенційного токсичного впливу та знайдених концентрацій у водоймах поблизу воєнних подій. У рамках аналітичного огляду стану водних ресурсів у лютому 2023 року у районі суббасейну нижнього Дніпра були зафіксовані перевищення концентрацій Cu (51 мкг/дм³) та Cd (1,9 мкг/дм³) [3]. У басейні річки Сіверський Донець, зокрема у річці Бахмутка, виявлено концентрації Sr (3977 мкг/дм³) та Li (43,1 мкг/дм³) [1, 8]. Після знищення Каховської дамби 6 червня 2023 року в басейні річки Дніпро було зафіксовано концентрацію Zn (55,5 мкг/дм³) [8, 13]. Також у водоймах поблизу військового полігону в Норвегії зафіксовано Sb з концентрацією 7,4 мкг/л [5, 21]. Цей метал був включений до схеми дослідження через його використання в боєприпасах та властивості, зокрема високу мобільність і доступність, що робить його потенційно здатним швидко і легко потрапити в екосистеми. Водночас, стибій практично не досліджували в українських водоймах, а завдяки зазначеним чинникам ймовірність його присутності є високою [5, 25].

З огляду на зазначене, метою дослідження стало вивчення впливу металів, що можуть забруднювати водні екосистеми внаслідок військової діяльності, на біопроекти у гідробіонтів. Результати дослідження сприятимуть кращому розумінню наслідків збройних конфліктів для довкілля та можуть бути використані для розробки природоохоронних заходів у зонах, де спостерігається підвищений ризик мілітарного забруднення.

Матеріали та методи досліджень

Експерименти на тваринах проводилися у відповідності до Європейської конвенції про захист хребетних тварин, які використовуються для експериментальних та наукових цілей (Страсбург, 1986), ухвали Першого національного конгресу з біоетики (Київ, 2000) та рішення етичної комісії Тернопільського національного педагогічного університету (Протокол № 2, 2020). Реактиви, що були використані в ході експерименту, постачало ТОВ «Хімлаборреактив» і вони мали кваліфікацію «хч» або вище.

Для перевірки токсичності екологічно реальних для водойм у зонах бойових дій концентрацій металів була застосована експериментальна модель *in vitro* з використанням гепатоцитів та гомогенату мозку коропа звичайного (*Cyprinus carpio*).

Тварин з рибного господарства транспортували до лабораторії в резервуарах об'ємом з аерованою водою. Після аклімації рибу анестезували крижаною банею та умертвляли під етерним наркозом. Усі подальші процедури з відбору і обробки тканини проводили на холоді. Гепатоцити *C. carpio* отримували шляхом перфузії печінки через ворітну вену. Клітини розділяли шляхом лізування в 100 мкл 0,1 % трипсину/ЕДТА протягом 2 хв [14]. Для подальшого використання клітини ресуспендували в збалансованому сольовому розчині Хенка без Ca²⁺ і Mg²⁺ до кількості 10⁷ клітин/мл.

Життєздатність клітин оцінювали після кожної процедури виділення для кожного типу клітин шляхом вивільнення трипанового синього. У всіх досліджуваних випадках життєздатність клітин становила 96,2±3,3 % без статистично вірогідних відмінностей (p>0.05).

Гепатоцити коропа (~10⁷ клітин/мл) витримували протягом 24 годин в присутності йонів Купруму (51 мкг Cu²⁺/дм³), Сторонцію (3977 мкг Sr²⁺/дм³), Цинку (55,5 мкг Zn²⁺/дм³), їх суміші в аналогічних концентраціях та в суміші, доповненій Кадмієм (1,9 мкг Cd²⁺/дм³), Стибієм (7,4 мкг Sb⁵⁺/дм³) та Літієм (43,1 мкг Li⁺/дм³). Група контролю не піддавалася дії жодних додаткових чинників. Після експозиції вимірювали параметри окисного стресу (загальна антиоксидантна активність, активність каталази, перокисне окиснення ліпідів та вміст окисних модифікацій протеїнів), стану клітинних тіолів (вміст глутаніону та активність глутатіон S-трансферази), нейротоксичності (активність холінестерази) та апоптозу (активність каспази-3).

Активність каталази (САТ) визначали за методом Аебі [4], який ґрунтується на зменшенні оптичної густини внаслідок розкладання пероксиду водню під дією каталази. Вимірювання проводили спектрофотометрично при довжині хвилі 240 нм, активність ензиму обраховували за мілімолярним коефіцієнтом і виражали в мкмоль / (мг розчинного протеїну*хв).

Вміст окисних модифікацій протеїнів (ОМП) та перокисного окиснення ліпідів (ПОЛ) визначали в спільній пробі ізольованих гепатоцитів після осадження протеїнів за допомогою

20 % сульфосаліцилової кислоти. Для характеристики ПОЛ вимірювали кількість утворених у результаті реакції з 2-тіобарбітуровою кислотою ТБК-активних продуктів [16]. Визначення проводили при 532 нм відносно контролю на реактиви, обрахунок – за молярним коефіцієнтом екстинції комплексу ($\epsilon = 1,56 \cdot 10^5 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$). ОМП визначали на основі утворених 2,4-динітрофенілгідразонів [2]. Оптичну густину реєстрували за 370 нм, вміст ушкоджених протеїнів обраховували на основі молярного коефіцієнту екстинції ($2,1 \times 10^4 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$).

Вміст загального глутатіону (GSH) визначали з допомогою реактиву Елмана [4, 12], опираючись на здатності GSH окиснюватися ДТНБ до окисненої форми (GSSG) з утворенням 5-тіо-2-нітробензойної кислоти. Вимірювання проводили при 412 нм, стандартні розчини виготовляли з відновленого глутатіону, концентрацію виражали в мкмоль на г вологої маси тканини. Активність глутатіон S-трансферази (GST) визначали за утворенням аддуктів 1-хлоро-2,4-динітробензену із глутатіоном. Поглинання світла реєстрували при довжині хвилі 340 нм через 5 хв після початку реакції, активність ензиму обчислювали за коефіцієнтом екстинції ($9,6 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$) [15].

Активність каспази 3 (Cas-3) визначали за утворенням п-нітроаніліну під дією каспази 3 у лізаті клітин. Інтенсивність світлопоглинання визначали після 2 годин інкубування за температури 37 °C і довжини хвилі 405 нм. Активність ензиму виражали в нмоль/мг протеїну [19]. Активність холінестерази (ChE) визначали за здатністю гідролізувати ацетилтіохолін йодид при 25 о C. Індикатором тіолових груп виступала ДТНБ [12]. Активність ChE виражали в нмоль гідролізованого ацетилтіохолін йодиду/хв *мг протеїну.

Результати вимірів подані у вигляді $M \pm SD$ для 8 зразків. Вірогідною вважали відмінність між рядами за $p < 0,05$. Для Аналізу одержаних даних використовували комп'ютерні програми GraphPad Prism 8 та Exel для Windows-2016. Аналіз отриманих біологічних показників здійснювали з допомогою комп'ютерних програм Statistica v 12.0 та Exel для Windows-2016.

Результати досліджень та їх обговорення

Відомо, що забруднення обраними металами водних екосистем несе загрозу для гідробіонтів шляхом впливу на ряд фізіологічних і метаболічних процесів. Так, у підвищених концентраціях мідь порушує функції дихальної системи риб, впливаючи на роботу зябер і кровообіг; цинк у надлишку порушує метаболізм кальцію та роботу нервової системи; стронцій здатний замінювати кальцій у скелетних структурах, що призводить до пригнічення росту та рухової активності; літій негативно впливає на ендокринну систему, змінюючи рівень гормонів, які контролюють життєво важливі процеси, та викликає порушення репродуктивної функції; кадмій є високотоксичним, порушує функції нирок і печінки, індукує апоптоз у клітинах; стибій порушує обмін речовин, впливає на поведінкові реакції риб, знижуючи їхню здатність до адаптації в природному середовищі [5, 23].

Разом з тим, спільною негативною дією надлишку металів є їх здатність провокувати окисний стрес, продукти якого пошкоджують клітинні мембрани, змінюють активність транспортних процесів, порушують баланс метаболічних реакцій та викликають дисфункцію органів [21].

Обрані нами для дослідження показники є важливими індикаторами адаптаційних процесів організму, які охоплюють клітинний та організмний рівень, і дають змогу встановити потенційний ефект діючих чинників. Так, загальна антиоксидантна активність (ЗАА) характеризує здатність організму нейтралізувати вільні радикали, захищаючи клітини від окисного стресу. Важливість її вивчення полягає у визначенні рівня стійкості організму до токсичних впливів. Перекисне окислення ліпідів (ПОЛ) є процесом руйнування ліпідів мембран під впливом вільних радикалів, відтак збільшення кількості пошкоджених ліпідів свідчить про руйнування клітинних мембранних структур [9].

Окисні модифікації протеїнів (ОМП) виникають внаслідок взаємодії протеїнів з реактивними формами кисню, що призводить до втрати їхньої функціональності. Вивчення ОМП допомагає оцінити рівень клітинного стресу. Щодо ензиматичного забезпечення антиоксидантної діяльності, то каталаза – ензим, який розкладає перекис водню,

попереджаючи його токсичний вплив. Її активність є індикатором здатності організму протидіяти окисному стресу. Глутатіонтрансфераза – ензим, який бере участь у детоксикації ксенобіотиків і продуктів окисного стресу. Водночас, глутатіон – основний внутрішньоклітинний антиоксидант, що підтримує редокс-баланс і захищає клітини від пошкоджень. Його кількість відображає стан антиоксидантного захисту. Каспаза-3 є ключовим ензимом апоптозу, що спричиняє програмовану загибель клітин. Вивчення її активності дозволяє оцінити процеси клітинної смерті. Ацетилхолінестераза відповідає за розщеплення ацетилхоліну в синапсах, забезпечуючи нормальну нейронну функцію. Зміна її активності свідчить про небезпечні прояви зміни передачі між нейронами, а відтак про суттєві прояви нейротоксичності за дії металів як окремо, так і у суміші [18, 19].

Зазначимо, що ці маркери є критично важливими для оцінки токсичності забруднень та розробки заходів з охорони навколишнього середовища. Вивчення зазначених показників дозволяє визначити комплексний вплив токсикантів на водні організми, що спрогнозує в подальшому особливості функціонування тих чи інших водойм за дії полутантів різної природи [20].

Результати досліджень показали, що вплив окремих металів (мідь, цинк, стронцій) та їх сумішей (мідь, стронцій, цинк – у першій суміші; мідь, стронцій, цинк, кадмій, стибій, літій – у другій) характеризувався різним рівнем токсичності (рис. 1). Так, щодо загальної антиоксидантної активності у гепатоцитах коропа, то найбільш негативний ефект проявляла мідь (більш ніж на 20 % зменшилася ЗАА відносно контролю), тоді як цинк та суміші металів спричиняли здебільшого однакову дію. Стосовно каталази, то у дослідах ми не відмітили достовірних змін її активності у клітинах печінки як порівняно з контролем, так і між групами, що свідчить про доволі високу стабільність та консервативність у цього ензиму за стресових чинників. Водночас, найбільш помітного ушкодження ліпиди зазнавали за дії стронцію і цинку, а також суміші міді, цинку, стронцію, кадмію, стибію і літію. Протеїни піддавалися впливу міді та суміші міді, стронцію, кадмію, літію та стибію.

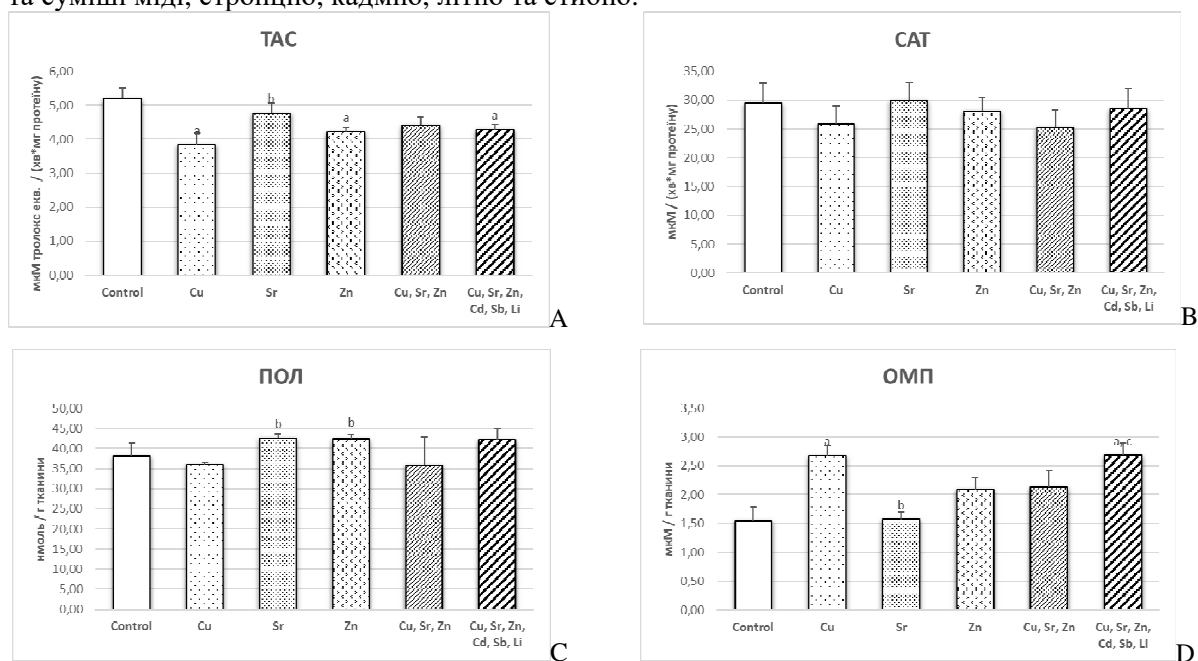


Рис. 1: Показники стану антиоксидантної системи у гепатоцитах *C. carpio* за впливу металів та їх сумішей у концентраціях, що спостерігаються у водоймах в районах бойових дій: А – загальна антиоксидантна активність; В – активність каталази; С – перокисне окиснення ліпідів; D – окисні модифікації протеїнів. Літери над стовбцями означають достовірну відмінність від групи контролю (a), Cu (b), Sr (c), Zn (d), суміші Cu, St, Zn (e).

Загалом, щодо стану антиоксидантної системи у гепатоцитах *C. carpio* з'ясовано, що мідь проявила найбільш токсичну дію серед окремих елементів, викликаючи порушення клітинної життєдіяльності та окисний стрес, тоді як цинк і стронцій мали помірний та слабкий токсичні впливи відповідно. У першій суміші спостерігалася синергія токсичності, де мідь значно посилювала ефект цинку й стронцію. Друга суміш через додавання кадмію й стибію демонструвала ще сильніший кумулятивний ефект, спричиняючи серйозні структурні порушення мембранної цілісності клітин та накопичення продуктів окисного стресу.

Тіолова система в гепатоцитах коропа за дії означених концентрацій металів меншою мірою піддавалася змінам (рис. 2). Активність глутатіон-S-трансферази практично не змінювалася, що свідчить про належні процеси детоксикації ксенобіотиків у печінці риби. Проте кількість відновленого глутатіону зменшувалася за дії обох сумішей металів, що засвідчує посилення оксидативного стресу через утворення активних форм кисню, оскільки метали кадмій і стибій здатні порушувати роботу ензимів, які беруть участь у відновленні GSH (глутатіонредуктази), що додатково ускладнює підтримку його рівня [11]. Водночас, інші метали, такі як цинк або літій, можуть мати протекторний ефект, але при комбінованому впливі він часто недостатній для компенсації загальної токсичності суміші [23]. Таким чином, вплив сумішей металів призводить до значного зниження рівня відновленого глутатіону в клітинах печінки *C. carpio*, що послаблює антиоксидантний захист гепатоцитів та провокує окисне ушкодження протеїнів, ліпідів і ДНК.

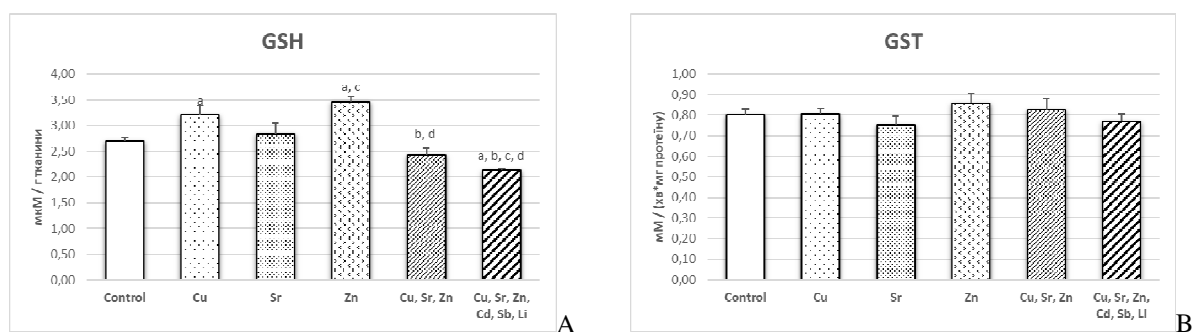


Рис. 2: Показники стану тіолової системи у гепатоцитах *C. carpio* за впливу металів та їх сумішей у концентраціях, що спостерігаються у водоймах в районах бойових дій: А – вміст глутатіону; В – активність глутатіон-S-трансферази. Літери над стовбцями означають достовірну відмінність від групи контролю (a), Cu (b), Sr (c), Zn (d), суміші Cu, St, Zn (e).

Суміші металів можуть значно впливати на активність ензимів через здатність пошкоджувати мітохондрії, індукувати окисний стрес, змінювати іонний баланс і взаємодіяти з активними центрами. Вивчення змін активності ензимів каспази та ацетилхолінестерази підтвердили високу потенційну небезпеку, яку становлять досліджувані у водному середовищі метали для риб (рис. 3).

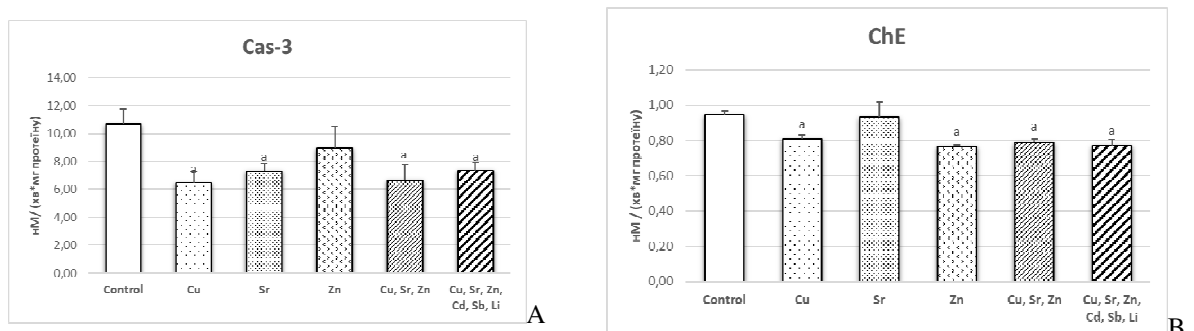


Рис. 3: Показники апоптозу у гепатоцитах та нейротоксичності у мозку *C. carpio* за впливу металів та їх сумішей у концентраціях, що спостерігаються у водоймах в районах бойових дій: А – активність каспази-3; В – активність холінестерази. Літери над стовбцями означають достовірну відмінність від групи контролю (a), Cu (b), Sr (c), Zn (d), суміші Cu, Sr, Zn (e).

Так, отримані результати показали, що активність холінестерази у клітинах мозку коропа достовірно зменшувалася, особливо за дії суміші металів. Варто зауважити, ацетилхолінестераза є ключовим ензимом, який регулює передачу нервових імпульсів шляхом гідролізу ацетилхоліну. Метали здатні зв'язуватися з активним центром ензиму та змінювати його конформацію, знижуючи таким чином його активність. Також є інформація, що мідь і стибій, які стимулюють утворення активних форм кисню, провокують окислення важливих амінокислотних залишків у складі ензиму, що теж безпосередньо впливає на функціонування холінестерази та призводить до порушення передачі нервових імпульсів і нейротоксичних ефектів [11, 19].

Водночас, активність каспази у *C. carpio* зменшувалася, що свідчить про зниження процесів запрограмованого апоптозу, а відтак активацію некротичних процесів, які узгоджуються з порушеннями метаболічних процесів, обумовлених окисним стресом, збільшенням окисномодифікованих протеїнів, зменшенням глутатіону та зниженням загальної антиоксидантної активності [6, 18].

Отже, на основі вищесказаного можна зробити висновок, що суміші металів зазвичай чинять більш виражений вплив, ніж окремі елементи, завдяки синергії між компонентами, який проявляється активацією окисних процесів, виснаженням тілової системи та порушенням нервової регуляції організму риб. Таким чином, наші дослідження підкреслюють важливість систематичного вивчення впливу металів та їх сумішей на водні організми для отримання ефективних та неспецифічних біомаркерів токсичної дії щодо проявів окисних процесів, зміни активності ензимів антиоксидантного захисту та апоптозу, що дозволить більш точно прогнозувати оцінки стану стабільності і виживаності популяцій риб та екосистеми загалом.

Висновки

Дослідження показало, що екологічно реальні для зони бойових дій концентрації окремих металів (мідь, цинк, стронцій) та їх сумішей (з кадмієм, літєм та стибієм) мають суттєвий вплив на функціональний стан коропа. Найбільш токсичним металом виявилася мідь, яка викликає окисний стрес, зниження рівня відновленого глутатіону та порушення клітинних функцій. Цинк і стронцій проявили помірну та слабку токсичність відповідно. Суміші металів демонстрували синергічний ефект, який значно посилював негативний вплив на антиоксидантну систему риб, зокрема шляхом виснаження пулу глутатіону та активації оксидативного стресу.

Сукупний вплив металів також сприяв зміні активності каспаз і ацетилхолінестерази, що призводило до індукції метаболічних змін та порушення нервової регуляції. Особливо шкідливими виявилися суміші з додаванням кадмію та стибію, які найбільшою мірою знижували функціональні показники коропа. Таким чином, метали та їх суміші чинять багатокомпонентний негативний вплив, що потребує подальшого моніторингу та розробки заходів для зменшення токсичності у водних екосистемах.

1. Державне агентство водних ресурсів України. Аналітичний огляд стану водних ресурсів у лютому 2023 року. URL: <https://davt.gov.ua/news/analitichnij-oglyad-stanu-vodnih-resursiv-u-lyutomu-2023-roku> (дата звернення: 5.10.2024).
2. Лушак В., Багнюкова Т., Лушак О. Показники оксидативного стресу. 1. Тіобарбітурат активні продукти і карбонільні групи білків. *Український біохімічний журнал*. 2004. 76 (3). С. 136–141.
3. Рацлав В. В. Дослідження хімічного стану якості вод басейну річки Сіверський Донець через визначення ПР ВРД. *Екологічні науки*. 2022. № 1(28). С. 228–234. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-008-7.2-12>.
4. Aebi H., Wyss S. R., Scherz B., Skvaril F. Heterogeneity of Erythrocyte Catalase II. Isolation and Characterization of Normal and Variant Erythrocyte Catalase and Their Subunits. *European Journal of*

- Biochemistry*. 1974.48 (1): 137–45. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/4141308> (Last accessed: 20.08.2024).
5. Altahaan Z., Dobslaw D. Assessment of the Impact of War on Concentrations of Pollutants and Heavy Metals and Their Seasonal Variations in Water and Sediments of the Tigris River in Mosul/Iraq. *Environments*. 2024. Vol. 11, No. 10. <https://doi.org/10.3390/environments11010010>.
 6. Alvarado C., Ramírez J., Herrera-López E. J., Cortez D., Ramirez G. Bioaccumulation of Metals in Cultured Carp (*Cyprinus carpio*) from Lake Chapala, Mexico. *Biological Trace Element Research*. 2020. 195. doi:10.1007/s12011-019-01845-w.
 7. Anderson M. E. Determination of Glutathione and Glutathione Disulfide in Biological Samples. *Methods in Enzymology*. 1985. N 113 (1): 548–55. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(85\)13073-9](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(85)13073-9).
 8. Barker A. J., Clausen J. L., Douglas T. A., Bednar A. J., Griggs C. S., Martin W. A. Environmental impact of metals resulting from military training activities: A review. *Chemosphere*. 2021. Vol. 265. Article No. 129110. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129110>.
 9. Bonomini S., Dottori L., Amoroso A., Sirolli V. Increased Platelet Phosphatidylserine Exposure and Caspase Activation in Chronic Uremia. *Journal of Thrombosis and Haemostasis*. 2004. 2 (8): 1275–81. <https://doi.org/10.1111/j.1538-7836.2004.00837.x>.
 10. Broomandi P., Guney M., Kim J. R., Karaca F. Soil Contamination in Areas Impacted by Military Activities: A Critical Review. *Environments*. 2024. Vol. 11, No. 10. <https://doi.org/10.3390/su12219002>.
 11. Dulić Z., Živić I., Pergal M., Živić M., Stanković M., Manojlović D., Marković Z. Accumulation and seasonal variation of toxic and trace elements in tissues of *Cyprinus carpio* from semi-intensive aquaculture ponds. *Ann. Limnol. - Int. J. Limn.*, 2018. 54 (4). <https://doi.org/10.1051/limn/2017036>.
 12. Ellman G., Courtney K., Andres V., Feather-Stone R. A New and Rapid Colorimetric Determination of Acetylcholinesterase Activity. *Biochemical Pharmacology*. 1961. 7 (2). [https://doi.org/10.1016/0006-2952\(61\)90145-9](https://doi.org/10.1016/0006-2952(61)90145-9).
 13. Environmental Institute, National and Kapodistrian University of Athens. Investigative Monitoring of the Chemical Pollution in the Kherson Region. EU/UNDP Project: European Union for Improving Environmental Monitoring in the Black Sea (EU4EMBLAS). 2024. URL: <https://emblasproject.org/wp-content/uploads/2024/10/Nova-Kakhovka-DRAFT-FINAL-REPORT-0524-rev3-inclAnx.pdf>. (дата звернення: 6.10.2024).
 14. Grunow B., Noglick S., Kruse Ch., Gebert M. Isolation of Cells from Atlantic Sturgeon *Acipenser oxyrinchus oxyrinchus* and Optimization of Culture Conditions. *Aquatic Biology*. 2021. 14 (1): 67–75. <https://doi.org/10.3354/AB00383>.
 15. Habig W. H., Pabst M. J., Jakoby W. B. Glutathione S-Transferases. The First Enzymatic Step in Mercapturic Acid Formation. *The Journal of Biological Chemistry*. 1974. 249 (22): 7130–7139. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/4436300> (дата звернення 20.08.2024).
 16. Hiroshi O., Ohishi N., Yagi K. Assay for Lipid Peroxides in Animal Tissues by Thiobarbituric Acid Reaction. *Analytical Biochemistry*. 1979. 95 (2): 351–58. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(79\)90738-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(79)90738-3).
 17. Hryhorczuk D., Levy B. S., Prodanchuk M., Kravchuk O., Bubalo N., Hryhorczuk A., Erickson T. B. The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*. 2024. Vol. 19, No. 1. <https://doi.org/10.1186/s12995-023-00398-y>.
 18. Jaiswal A., Verma A., Jaiswal P. Detrimental Effects of Heavy Metals in Soil, Plants, and Aquatic Ecosystems and in Humans. *J. Environ. Pathol. Toxicol. Oncol.* 2018;3 7:183–197. doi: 10.1615/JEnvironPatholToxicolOncol.2018025348.
 19. Liu Y, Chen Q, Li Y, Bi L, Jin L, Peng R. Toxic Effects of Cadmium on Fish. *Toxics*. 2022 Oct 19;10 (10):622. doi: 10.3390/toxics10100622.
 20. Okereafor U., Makhatha M., Mekuto L., Uche-Okereafor N., Sebola T., Mavumengwana V. Toxic Metal Implications on Agricultural Soils, Plants, Animals, Aquatic life and Human Health. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2020; 17: E2204. doi: 10.3390/ijerph17072204.
 21. Okkenhaug G., Smebye A. B., Pabst T., Amundsen C. E., Sævarsson H., Breedveld G. D. Shooting range contamination: mobility and transport of lead (Pb), copper (Cu) and antimony (Sb) in contaminated peatland. *Journal of Soils and Sediments*. 2018. Vol. 18. P. 3310–3323. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-1922-x>.
 22. Pereira P., Bašić F., Bogunovic I., Barcelo D. Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 837. Article No. 155865. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865>.
 23. Prakash B. O. Health Risks of Potentially Toxic Metals Contaminated Water. *IntechOpen*. 2020. doi: 10.5772/intechopen.92141.

24. Skalny A. V., Aschner M., Bobrovniksky I., Chen P., Tsatsakis A., Paoliello M., Buha A., Tinkov A. A. Environmental and health hazards of military metal pollution. *Environmental Research*. 2021. Vol. 201. Article No. 111568. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111568>.
25. Ukraine conflict environmental briefing: The coastal and marine environment. Conflict and Environment Observatory. 2022. URL: <https://ceobs.org/ukraine-conflict-environmental-briefing-the-coastal-and-marine-environment>. (дата звернення: 10.10.2024).

References

1. Derzhavne ahenstvo vodnykh resursiv Ukrainy. Analitichnyi ohliad stanu vodnykh resursiv u liutomu 2023 roku. URL: <https://davr.gov.ua/news/analitichnij-oglyad-stanu-vodnih-resursiv-u-lyutomu-2023-roku> (data zvernennia: 5.10.2024). [in Ukrainian]
2. Lushchak V., Bahniukova T., Lushchak O. Pokaznyky oksydatyvnoho stresu. 1. Tiobarbiturat aktyvni produkty i karbonilni hrupy bilkiv. *Ukrainskyi biokhimichnyi zhurnal*. 2004. 76 (3): 136–41. [in Ukrainian]
3. Ratslav V. V. Doslidzhennia khimichnoho stanu iakosti vod baseynu richky Siverskyi Donets cherez vyznachennia PR VRD. *Ekolohichni nauky*. 2022. No 1(28). S. 228–234. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-008-7.2-12>. [in Ukrainian]
4. Aebi H., Wyss S. R., Scherz B., Skvaril F. Heterogeneity of Erythrocyte Catalase II. Isolation and Characterization of Normal and Variant Erythrocyte Catalase and Their Subunits. *European Journal of Biochemistry*. 1974.48 (1): 137–45. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/4141308> (Last accessed: 20.08.2024).
5. Altahaan Z., Dobslaw D. Assessment of the Impact of War on Concentrations of Pollutants and Heavy Metals and Their Seasonal Variations in Water and Sediments of the Tigris River in Mosul/Iraq. *Environments*. 2024. Vol. 11, No. 10. <https://doi.org/10.3390/environments11010010>.
6. Alvarado C., Ramírez J., Herrera-López E. J., Cortez D., Ramirez G. Bioaccumulation of Metals in Cultured Carp (*Cyprinus carpio*) from Lake Chapala, Mexico. *Biological Trace Element Research*. 2020. 195. doi:10.1007/s12011-019-01845-w.
7. Anderson M. E. Determination of Glutathione and Glutathione Disulfide in Biological Samples. *Methods in Enzymology*. 1985. N 113 (1): 548–55. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(85\)13073-9](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(85)13073-9).
8. Barker A. J., Clausen J. L., Douglas T. A., Bednar A. J., Griggs C. S., Martin W. A. Environmental impact of metals resulting from military training activities: A review. *Chemosphere*. 2021. Vol. 265. Article No. 129110. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129110>.
9. Bonomini S., Dottori L., Amoroso A., Sirolli V. Increased Platelet Phosphatidylserine Exposure and Caspase Activation in Chronic Uremia. *Journal of Thrombosis and Haemostasis*. 2004. 2 (8): 1275–81. <https://doi.org/10.1111/j.1538-7836.2004.00837.x>.
10. Broomandi P., Guney M., Kim J. R., Karaca F. Soil Contamination in Areas Impacted by Military Activities: A Critical Review. *Environments*. 2024. Vol. 11, No. 10. <https://doi.org/10.3390/su12219002>.
11. Dulić Z., Živić I., Pergal M., Živić M., Stanković M., Manojlović D., Marković Z. Accumulation and seasonal variation of toxic and trace elements in tissues of *Cyprinus carpio* from semi-intensive aquaculture ponds. *Ann. Limnol. - Int. J. Limnol.*, 2018. 54 (4). <https://doi.org/10.1051/limn/2017036>.
12. Ellman G., Courtney K., Andres V., Feather-Stone R. A New and Rapid Colorimetric Determination of Acetylcholinesterase Activity. *Biochemical Pharmacology*. 1961. 7 (2). [https://doi.org/10.1016/0006-2952\(61\)90145-9](https://doi.org/10.1016/0006-2952(61)90145-9).
13. Environmental Institute, National and Kapodistrian University of Athens. Investigative Monitoring of the Chemical Pollution in the Kherson Region. EU/UNDP Project: European Union for Improving Environmental Monitoring in the Black Sea (EU4EMBLAS). 2024. URL: <https://emblasproject.org/wp-content/uploads/2024/10/Nova-Kakhovka-DRAFT-FINAL-REPORT-0524-rev3-inclAnx.pdf>. (Last accessed: 6.10.2024).
14. Grunow B., Noglick S., Kruse Ch., Gebert M. Isolation of Cells from Atlantic Sturgeon *Acipenser oxyrinchus oxyrinchus* and Optimization of Culture Conditions. *Aquatic Biology*. 2021. 14 (1): 67–75. <https://doi.org/10.3354/AB00383>.
15. Habig W. H., Pabst M. J., Jakoby W. B. Glutathione S-Transferases. The First Enzymatic Step in Mercapturic Acid Formation. *The Journal of Biological Chemistry*. 1974. 249 (22): 7130–7139. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/4436300> (Last accessed: 20.08.2024).
16. Hiroshi O., Ohishi N., Yagi K. Assay for Lipid Peroxides in Animal Tissues by Thiobarbituric Acid Reaction. *Analytical Biochemistry*. 1979. 95 (2): 351–58. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(79\)90738-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(79)90738-3).
17. Hryhorczuk D., Levy B. S., Prodanchuk M., Kravchuk O., Bubalo N., Hryhorczuk A., Erickson T. B. The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*. 2024. Vol. 19, No. 1. <https://doi.org/10.1186/s12995-023-00398-y>.

18. Jaiswal A., Verma A., Jaiswal P. Detrimental Effects of Heavy Metals in Soil, Plants, and Aquatic Ecosystems and in Humans. *J. Environ. Pathol. Toxicol. Oncol.* 2018;3 7:183–197. doi: 10.1615/JEnvironPatholToxicolOncol.2018025348.
19. Liu Y, Chen Q, Li Y, Bi L, Jin L, Peng R. Toxic Effects of Cadmium on Fish. *Toxics.* 2022 Oct 19;10 (10):622. doi: 10.3390/toxics10100622.
20. Okereafor U., Makhatha M., Mekuto L., Uche-Okereafor N., Sebola T., Mavumengwana V. Toxic Metal Implications on Agricultural Soils, Plants, Animals, Aquatic life and Human Health. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2020; 17: E2204. doi: 10.3390/ijerph17072204.
21. Okkenhaug G., Smebye A. B., Pabst T., Amundsen C. E., Sævarsson H., Breedveld G. D. Shooting range contamination: mobility and transport of lead (Pb), copper (Cu) and antimony (Sb) in contaminated peatland. *Journal of Soils and Sediments.* 2018. Vol. 18. P. 3310–3323. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-1922-x>.
22. Pereira P., Bašić F., Bogunovic I., Barcelo D. Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of The Total Environment.* 2022. Vol. 837. Article No. 155865. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865>.
23. Prakash B. O. Health Risks of Potentially Toxic Metals Contaminated Water. *IntechOpen.* 2020. doi: 10.5772/intechopen.92141.
24. Skalny A. V., Aschner M., Bobrovitsky I., Chen P., Tsatsakis A., Paoliello M., Buha A., Tinkov A. A. Environmental and health hazards of military metal pollution. *Environmental Research.* 2021. Vol. 201. Article No. 111568. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111568>.
25. Ukraine conflict environmental briefing: The coastal and marine environment. Conflict and Environment Observatory. 2022. URL: <https://ceobs.org/ukraine-conflict-environmental-briefing-the-coastal-and-marine-environment>. (Last accessed: 10.10.2024).

O. I. Horyn, M. M. Hladchuk, O. I. Bodnar

Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine

ECOTOXICOLOGICAL ASSESSMENT OF THE IMPACT OF REAL CONCENTRATIONS OF METALS OF MILITARY ORIGIN ON AQUATIC ORGANISMS

This article presents an ecotoxicological evaluation of the impact of environmentally relevant concentrations of military-derived metals on aquatic organisms, using the common carp (*Cyprinus carpio*) as a model species. The study assessed total antioxidant activity, lipid peroxidation (LPO) intensity, oxidative protein modifications (OPM) levels, catalase and glutathione transferase activity, as well as glutathione levels in the brain, liver cells, and blood of the carp. Additionally, the activity of caspase-3 and acetylcholinesterase was examined under exposure to zinc (Zn), antimony (Sb), copper (Cu), and their mixtures with lithium (Li) and cadmium (Cd).

The results demonstrated significant alterations in the antioxidant defense system of the exposed organisms. Elevated LPO and OPM levels indicated intensified oxidative stress, while fluctuations in catalase and glutathione transferase activity reflected adaptive responses to metal toxicity. A decline in glutathione levels suggested depletion of antioxidant reserves. The study of caspase-3 activity provided insights into apoptotic mechanisms, whereas changes in acetylcholinesterase activity pointed to potential neurotoxic effects.

These findings are crucial for understanding the ecological risks associated with military-origin metal contamination in aquatic ecosystems. They provide valuable data for developing environmental regulations and mitigation strategies to address metal pollution and its effects on aquatic biota.

Key words: aquatic organisms, toxicity, metals, military pollution.

Надійшла 08.11.2024.

¹Л. Р. ГРИЦАК, ²В. Г. КИЯК, ³Д. А. БОЙКО, ¹Н. М. ДРОБИК

¹Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка
вул. М. Кривоноса, 2, Тернопіль, 46027

²Інститут екології Карпат НАН України
вул. Козельницька, 4, Львів, 79026

³Львівський національний університет природокористування
вул. В. Великого, 1, Дубляни, Львівська область, 80831
e-mail: hrytsak1972@gmail.com

ТРАНСФОРМАЦІЯ ПЕРВИННИХ СТРАТЕГІЙ ВИДІВ РОДУ *GENTIANA* L. У ВИСОКОГІРНИХ ЦЕНОЗАХ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ

Наведено результати аналізу зміни диференціальних (онтогенез, вікова, просторова, віталітетна структури, тип самопідтримання) та інтегральних (індекс відновлення, тип стратегії) ознак стратегій популяцій рідкісних високогірних видів роду *Gentiana* L. (*Gentiana lutea* L., *Gentiana punctata* L., *Gentiana acaulis* L.), умови росту яких в Українських Карпатах відрізняються за інтенсивністю пасторального та рекреаційного навантаження, ступенем сільватизації і задерніння ґрунту. Показано, що досліджені види характеризуються різними типами первинних стратегій: *G. lutea* належить до К-стратегів, *G. punctata* – до К-S-типу, а *G. acaulis* – до S-R-типу. Тривала антропогенна трансформація високогірних ценозів Українських Карпат ослабила прояв ознак первинних типів стратегій видів. За росту в заповідних умовах, де популяції *G. lutea* піддаються слабкому стресу та слабким порушенням, вони набувають ознак К-S-типу (п. Лемська) або К-R –типу (г. Піп Іван Мармароський). Первинний тип стратегії виду *G. punctata* у заповідних умовах трансформується у К-S-R-тип (г. Піп Іван Мармароський), а стратегія *G. acaulis* змінюється на S-тип (г. Брескул). За збереження оптимальних абіотичних і фітоценотичних умов росту, але посилення процесів вилучення біомаси особин з популяції стратегія виду *G. lutea* змінюється на К-R-тип (гг. Шешул–Павлик), а у субпопуляції *G. acaulis* (г. Піп Іван Мармароський) ще більше посилюються ознаки стрес-толерантного типу.

Нами встановлено, що в умовах сильного стресу та сильних порушень, які характеризуються посиленням процесів сільватизації, задерніння ґрунту у поєднанні з вилученням біомаси особин, посилюється прояв ознак стрес-толерантного типу стратегії у популяціях усіх видів. Це призводить також до поступового зниження щільності рослин, зменшення площі популяційного ареалу та, відповідно, поступового згасання популяцій. Ці процеси зафіксовано в оселищі виду *G. lutea* на г. Ворожеска, у місцях росту виду *G. punctata* на г. Татул і г. Ворожеска, а також у локалітетах виду *G. acaulis* на горах Говерла, Туркул, Ребра.

Ключові слова: види роду *Gentiana* L., типи екологічних стратегій популяції рослин, Українські Карпати.

У сучасних умовах трансформації довкілля рослини можуть перенести стрес й адаптуватися до швидких змін середовища лише за умови ініціювання низки механізмів, що дозволяють зменшити навантаження на процеси поглинання й біосинтезу сполук та економніше використовувати усі ресурси [8]. Найбільш високим адаптивним потенціалом володіють ті рослини, потужність розвитку підземних і надземних органів яких відповідає абіотичним і біотичним умовам росту. До важливих детермінантних ознак, що дозволяють визначити рівень економії ресурсів рослиною, належать фотосинтетична фіксація карбону, приріст біомаси, інтенсивність розкладання підстилки і, відповідно, доступність поживних речовин в екосистемі для фітобіоти [7, 15]. Тому, дослідження змін спектрів функціональних ознак, за якими оцінюють інтенсивність процесів життєдіяльності рослин та час утримання території їхньою популяцією, дозволяє проаналізувати надходження, використання, кругообіг енергії та речовин в екосистемі. Аналізуючи динаміку параметрів цих функціональних ознак рослин, можна визначити не лише позиції виду щодо інших видів у поліваріантних умовах росту, але й

виокремити різні типи його екологічної адаптивної поведінки, яку асоціюють із терміном «стратегія виду» [13].

У науковій літературі за майже 50 років означення терміну «стратегія виду» трансформувалося: від характеристики еволюційних процесів [11] до опису механізмів стабільності фітоценозів [5] та здатності природно-історичної популяції формувати генетичну та екологічну структури [5]. Згідно із еколого-генетичним підходом, тип стратегії виду є домінантним для усіх його популяцій і відображає сукупність пристосувань, рис і властивостей, які проявляються в процесі реалізації генотипів особин у мінливих умовах біотичного, абіотичного, антропогенного середовища та забезпечують тривале існування виду, можливість захоплювати вільні екологічні ніші, переживати стрес і відновлювати структуру своїх популяцій [5]. Згідно із поглядами Й. В. Царика із співавторами [5], на рівні конкретної популяції виду домінують ті ознаки, які притаманні його первинній стратегії. Змінюється лише інтенсивність прояву ознак інших типів. Як види, так і їх популяції володіють первинними і вторинними типами стратегій [5].

У межах ареалу виду популяції рослин відрізняються за віковою, просторовою, віталітетною структурами, фітоценотичними умовами росту, способами міжпопуляційного потоку генів і характером взаємодії з абіотичними та біотичними факторами середовища [16]. Застосування методології виокремлення типів екологічних стратегій дозволяє точніше описати стан життєвості рослин, стійкість їх популяцій у певних умовах росту, порівнюючи із підходами, що використовують традиційні категорії «життєвих форм» або «функціональних типів рослин», виділених за певними морфологічними ознаками [17, 18]. Екологічні типи стратегії визначаються за набором ознак, які характеризують способи відновлення популяцій і підтримання їх стабільності, тому можуть використовуватися й для пояснення концептуального зв'язку між зміною екологічних умов довкілля та природним добром видів [Pierce et al., 2017]. Це скеровує дослідників на вивчення особливостей виживання популяцій у кожному конкретному випадку, що має особливе значення для розроблення методів управління популяціями.

Для збереження видів, яким загрожує зникнення, необхідно визначити популяції, які є найбільш вразливими, а також і ті, потенціал яких можна використати для підвищення адаптивних властивостей інших популяцій виду у мінливих умовах довкілля. Найбільш вразливими є гірські види рослин, які в умовах посилення глобального потепління, ініціювання резерватогенних сукцесій, пришвидшення процесів сільватизації субальпійських та альпійських лук тощо зміщують, скорочують свої ареали. В окремих випадках вони можуть змінити не лише оселища, але й середовища існування та адаптуватися до нових умов росту. Адаптивний потенціал таких видів визначається варіативністю генотипу їх особин, що й дозволяє популяціям пристосовуватися до зміни навколишнього середовища [12]. Рідкісні високогірні види *Gentiana lutea* L., *Gentiana punctata* L., *Gentiana acaulis* L. флори Українських Карпат належать до групи тих видів, трансформація ареалів яких відбулася в результаті ефекту сукупного впливу антропогенного, біотичного та абіотичного чинників. Нижня межа висотного діапазону росту рослин *G. lutea* за останнє століття змістилася з 900 м н. р. м. на 1400 м н. р. м. Вектор оптимуму абіотичних умов перемістився зі схилів південно-східної та південно-західної експозиції на прохолодніші північно-західні та північно-східні схили. У видів *G. punctata* та *G. acaulis* нижня межа висотного ареалу змістилася у висотному напрямі на 200–250 м і 300–350 м, відповідно, і проходить уже на рівні 1800–1850 м н. р. м. Рослини *G. punctata* здебільшого вже уникають схилів південної експозиції та концентрують у западинах рельєфу. Субпопуляції *G. acaulis* тяжіють до південних схилів, однак локалізуються вже на гіпсометричних рівнях, наближених до крайньої верхньої межі їх ареалу (1900–1950 м н. р. м.). Такі трансформаційні процеси супроводжуються зникненням популяцій цих видів із багатьох раніше відомих оселищ. Реалізація репатріаційних проєктів для стабілізації та відновлення ареалів цих видів в Українських Карпатах потребує виявлення ключових чинників і закономірностей змін їх ареалів [10], що передбачає аналіз адаптивних екологічних стратегій як видів, та і популяцій.

Виходячи із вище зазначеного, мета роботи полягала у дослідженні змін диференціальних (індивідуального та групового рівня) параметрів популяцій видів роду *Gentiana* L. у різних умовах росту та визначення на основі цього властивих їм типів первинних і вторинних стратегій та рівня адаптивного потенціалу до змін довкілля.

Матеріали та методи досліджень

Дослідження популяції *G. lutea*, *G. punctata* та *G. acaulis* були здійснені з 2004 р. по 2020 р. у різних їх місцезростаннях на території Українських Карпат (табл. 1).

Таблиця 1

Локалізація популяцій *G. lutea*, *G. punctata*, *G. acaulis* на території Українських Карпат

Вид	Місця знаходження	Висота над рівнем моря (м)
1	2	3
<i>G. lutea</i>	пол. Лемська (хр. Черногора, Рахівський р-н, Закарпатська обл.)	1700–1800
	г. Гутин Томнатик (хр. Черногора, Рахівський р-н, Закарпатська обл.)	1850–1950
	г. Пожижевська (хр. Черногора, Надвірнянський р-н, Івано-Франківська обл.)	1450–1455
	пол. Рогнеска (хр. Черногора, Рахівський р-н, Закарпатська обл.)	1450–1550
	г. Менчул Квасівський (хр. Черногора, Рахівський р-н, Закарпатська обл.)	1160–1190
	гг. Шешул-Павлик (хр. Черногора, Рахівський р-н, Закарпатська обл.)	1400–1700
	гг. Трояска–Татарука (хр. Свидовець, Рахівський р-н, Закарпатська обл.)	1300–1600
	г. Ворожеска (хр. Свидовець, Рахівський р-н, Закарпатська обл.)	1735
	пол. Крачунеска (хр. Свидовець, Рахівський р-н, Закарпатська обл.)	1500–1730
	г. Петрос (хр. Мармароські Альпи, Рахівський р-н, Закарпатська обл.)	01550–1725
г. Піп Іван (хр. Мармароські Альпи, Рахівський р-н, Закарпатська обл.)	11650–1930	
пол. Красна (хр. Полонинські Бескиди, Тячівський р-н, Закарпатська обл.)	2950–1450	
<i>G. punctata</i>	г. Говерла (хр. Черногора, Рахівський р-н, Закарпатська обл.)	1930
	г. Брескул (хр. Черногора, Надвірнянський р-н, Івано-Франківська обл.)	1770–1900
	г. Гутин Томнатик (хр. Черногора, Рахівський р-н, Закарпатська обл.)	1850–1950
	г. Піп Іван (хр. Мармароські Альпи, Рахівський р-н, Закарпатська обл.)	1800–1850
	г. Татул (хр. Свидовець, Рахівський р-н, Закарпатська обл.)	1650
	г. Ворожеска (хр. Свидовець, Рахівський р-н, Закарпатська обл.)	1735
<i>G. acaulis</i>	г. Говерла (хр. Черногора, Рахівський р-н, Закарпатська обл.)	1940
	г. Брескул (хр. Черногора, Надвірнянський р-н, Івано-Франківська обл.)	1850
	г. Туркул (хр. Черногора, Рахівський р-н, Закарпатська обл.)	1850–1900
	г. Ребра (хр. Черногора, Рахівський р-н, Закарпатська обл.)	1850
	г. Шпиці (хр. Черногора, Надвірнянський р-н, Івано-Франківська обл.)	1750–1800
	г. Гутин Томнатик (хр. Черногора, Рахівський р-н, Закарпатська обл.)	1850–1950
	г. Петрос (хр. Мармароські Альпи, Рахівський р-н, Закарпатська обл.)	1770–1775

Під час проведення досліджень застосовували маршрутні методи, які передбачали одноразові обліки за ходом маршрутів у Свидовецькому гірському масиві та Мармароських Альпах (Українські Карпати). На території Черногірського хребта було проведено дво-триразові спостереження за станом більшості локалітетів росту видів з інтервалом у 3–4 роки.

Визначали *тип стратегії* популяцій за еколого-генетичним підходом, запропонованим Й. Цариком із співавторами (2001), який об'єднує методики Дж. Грайма й О. Смирнової [5] та враховує диференційні ознаки на індивідуальному та груповому рівнях. Виділяли три типи первинних стратегій – конкурентний (К-тип), стрес-толерантний (S-тип), рудеральний (R-тип), враховуючі такий комплекс індикаційних ознак:

- 1) для видів-конкурентів: максимальний середньорічний приріст особин, великий обсяг фітомаси та площі листової поверхні, висока продуктивність діаспор, суцільне фітогенне поле та стабільний віковий спектр;

- 2) для стрес-толерантів: низький приріст біомаси, мала площа листової поверхні, здатність переходити до вторинного спокою, слабка продуктивність діаспор, малі вегетаційна рухливість і маса діаспор;
- 3) для рудералів: максимальна репродуктивна здатність, раннє насіннєве та вегетативне розмноження, максимальна потенційна та фактична продуктивність насіння тощо [5].

Вторинні типи стратегій популяцій визначали на основі комбінації диференційних ознак первинних типів [5]. Враховували також комбінацію абіотичних, біотичних, антропогенних чинників, що визначали інтенсивність стресу та порушень, яким піддавалися популяції. Під стресом розуміли вплив задерніння, затінення на популяцію, ущільнення ґрунту через витоптування; під порушенням – вилучення біомаси внаслідок випасу худоби, викопування населенням тощо.

Міжпопуляційну варіабельність оцінювали шляхом порівняння морфометричних показників репрезентативної вибірки – 50 генеративних особин з кожної популяції. Визначали такі метричні параметри: ширину та довжину листка, площу листової пластинки, кількість листків на один вегетативний пагін, діаметр генеративного і вегетативного пагонів, довжину та кількість метамерів генеративного пагона, висоту генеративного пагона, кількість генеративних і вегетативних пагонів на одну рослину, кількість квіток на одну особину, кількість квіток в одному кільці, кількість насінин у плоді. Зважаючи на те, що досліджувані види червонокнижні, аллометричні параметри, отримання яких потребує викопування рослин або пошкодження надземної маси, не досліджували.

Характер самопідтримання у популяціях визначали за кількісним співвідношенням особин генеративного та вегетативного походження. *Віталітетний аналіз* популяції проводили за методикою Ю. Злобіна (2012) [4].

Насіннєву продуктивність (НП) вивчали диференційовано за методиками І. Вайнагія, В. Вайнагія [2]. Елементарною одиницею НП вважали плід. Визначали кількість генеративних пагонів на особинах, кількість квіток (суцвіть) і плодів на пагонах, а також кількість незапліднених насіннєвих зачатків (ННЗ) і насіння (Н) у плодах. Коефіцієнт репродуктивної здатності (КРЗ) розраховували за відношенням коефіцієнта варіації насіннєвої продуктивності (база варіації) до її середнього арифметичного [5]. Репродуктивну здатність на популяційному рівні оцінювали за кількістю генеративних пагонів на 10 м².

Результати досліджень та їх обговорення

Зміна умов існування призвела не лише до зниження щільності особин і зменшення розмірів популяцій видів *G. lutea*, *G. punctata*, *G. acaulis*, але й позначилася на диференційних (онтогенез, вікова, просторова, віталітетна структури, тип самопідтримання) та інтегральних (індекс відновлення, тип стратегії) параметрах їх популяцій. Так, узагальнення результатів щодо особливостей біології та екології виду *G. lutea* показало, що його рослини мають великий обсяг фітомаси, значну площу листової поверхні, характеризуються не лише тривалим життєвим циклом, але й генеративним періодом. Цьому таксону властива й висока потенційна та фактична насіннєва продуктивність і відносно стабільні вікові спектри популяцій з переважанням генеративних рослин (в умовах еколого-ценотичного оптимуму). Такі властивості виду *G. lutea*, згідно з класифікацією первинних стратегій Й. В. Царика із співавторами [5], дозволяють віднести його до групи таксонів із конкурентним типом поведінки. Аналогічних поглядів щодо первинної стратегії виду *G. lutea* притримуються й інші дослідники [1, 5].

Проведений нами аналіз диференційних параметрів популяцій *G. lutea* показав, що жодна із них не володіє набором ознак лише конкурентного типу стратегій. Так, популяції на п. Лемська та г. Піп Іван Мармароський перебувають під впливом слабого стресу та слабких порушень, що характерно для К-стратегів. У цих обидвох оселищах відзначено високу щільність, дифузне розташування особин, переважання ролі генет у заміщенні поколінь та неглибоке омолодження особин, що є ознаками К-стратегії. Проте низка інших параметрів свідчить про посилення стрес-толерантних, а в окремих випадках й рудеральних ознак. Так, у віковому спектрі обох популяцій упродовж усього періоду досліджень збільшилася до 52-60 % кількість особин прегенеративної групи. Відомо, що лівосторонні спектри властиві популяціям

видів R-типу [6]. Проте, у складі прегенеративної групи на п. Лемська зростає частка (42 %) особин вегетативного походження, що є проявом вже ознак стрес-толерантності. На г. Піп Іван Мармароський – збільшення частки в прегенеративній групі як генет, так і ювенільних рослин, вказує на посилення ознак рудеральності.

Насіннева продуктивність рослин також належить до важливих диференційних ознак стратегії, оскільки дозволяє оцінити фізіологічні особливості особин та з'ясувати реакцію популяції на зміну факторів середовища [5]. Кількість насіння, що утворюється в одному плоді, характеризує не лише умови існування популяції, але й можливість її розселення на інші території [5]. Зазначають, що видам K-стратегам властиве тісне співвідношення між базою варіації продуктивності насіння та середнім її значенням на одиницю обліку. Тому коефіцієнт репродуктивної здатності (КРЗ) таких видів знаходиться в межах показників від 0,5 до 1,07. Стрес-толеранти мають ширшу базу варіації насінневої продуктивності, що дозволяє їм заселяти оселища інколи із невластивими для них умовами середовища. Відповідно, показники їх КРЗ коливаються в діапазоні від 1,08 до 1,77. Популяції R-стратегів характеризуються ще ширшою базою варіації, їх показники КРЗ знаходяться в межах 1,78–3,6 [5]. Аналіз даних, відображених у таблиці 2, дозволяє припустити, що популяція *G. lutea* на г. Піп Іван Мармароський ще належить до стрес-толерантів. Однак, динаміка показників КРЗ вже вказує на посилення проявів ознак рудеральності.

Таблиця 2

Коефіцієнт репродуктивної здатності особин *G. lutea* деяких досліджених популяціях

Місце росту	Рік дослідження	Кількість насіння на елементарну одиницю, шт	База варіації	КРЗ*
г. Пожижевська I (лучна ценопопуляція)	2012	47,9	38,41	0,8
г. Пожижевська II (лісова ценопопуляція)	2019	51,0	25,09	0,49
гг. Шешул-Павлик	2002	13,5	40	2,96
	2003	26,4	81,8	3,09
	2004	29,8	64,42	2,16
	2005	34,3	29,15	0,85
	2010	61,4	23,13	0,38
	2011	36	35,27	0,98
п. Рогнеска	2011	41,7	42,68	1,02
	2004	32,8	30,18	0,92
г. Менчул Квасівський	2005	38,6	32,9	0,85
	2010	36,9	30,62	0,83
	2011	39,5	47,08	1,19
гг. Трояска-Татарука	2011	44,9	59,95	1,34
г. Піп Іван Мармароський	2004	28,0 12,2	43,57	1,55
	2005	30,4	35,53	1,17
	2011	26,8	43,65	1,62
г. Петрос Мармароський	2011	43,3	42,6	0,98

Примітка. КРЗ* – коефіцієнт репродуктивної здатності.

Не менш вагомим параметром є й морфометричні показники особин популяцій. Це пов'язано з тим, що випас, витоптування у найбільшій мірі зумовлюють зменшення розмірів особин, їх фітомаси та площі листової поверхні [5]. Аналіз даних таблиці 3 показує, що більшість морфометричних параметрів популяції на п. Лемська є на 20–25 % меншими, порівнюючи з аналогічними показниками рослин з г. Піп Іван Мармароський. У цьому оселищі кількість особин «b» класу віталітету становить 58 %. Перевага же у популяції конкурентного типу особин низького рівня життєвості вказує на те, що в ній з'являються ознаки стрес-толерантів [5].

Отже, не зважаючи на перебування обох популяцій в умовах слабого стресу та слабких порушень на етапі досліджень, тривала попередня трансформація середовища позначилася на властивостях їх особин. Це й призвело до появи ознак стрес-толерантного типу стратегій, що найбільше характерно для популяції з п. Лемська. У популяції на г. Піп Іван Мармароський домінуючими є ознаки конкурентного типу. Збільшення частки (до 72 %) особин молодих вікових груп генеративного походження у її віковому спектрі є ознакою посилення рудеральності. Можна припустити, що за покращення умов росту відбудеться подальша стабілізація усіх диференціальних ознак конкурентного типу стратегії у цій популяції виду *G. lutea*.

До іншої групи належать популяції цього таксону на п. Рогнеска, г. Трояска–Татарука, п. Крачунеска, г. Петрос Мармароський, г. Гутин Томнатик. Усі вони зазнають впливу низки несприятливих екзогенних факторів: витоптування внаслідок рекреації та прогону худоби, сільватизація, задерніння ґрунту тощо. Тому умови їхнього існування відповідають комбінації чинників: сильний стрес – слабкі порушення. За такого поєднання факторів детермінуються ознаки стрес-толерантного типу стратегії. Це супроводжується низкою змін диференціальних параметрів популяцій, а саме: збільшенням у віковому спектрі (г. Гутин Томнатик, п. Рогнеска, г. Петрос Мармароський) віргінільних особин вегетативного походження; домінуванням компактно-дифузного типу просторового розташування (п. Рогнеска, г. Трояска–Татарука, п. Крачунеска, г. Петрос Мармароський); зниженням щільності особин (п. Крачунеска, г. Петрос Мармароський, г. Гутин Томнатик); зменшенням величин морфометричних параметрів (п. Рогнеска, п. Крачунеска) (табл. 3); перервами в цвітінні (усі місцевиростання); зниженням кількості генеруючих особин (п. Крачунеска, п. Рогнеска, г. Гутин Томнатик); зростанням показників КРЗ (г. Трояска–Татарука, п. Крачунеска); переважанням рамет над генетами (г. Трояска–Татарука, п. Крачунеска); втратою суцільного фітогенного поля (п. Рогнеска, г. Трояска–Татарука, п. Крачунеска, г. Петрос Мармароський, г. Гутин Томнатик). Крім того, у популяціях на г. Гутин Томнатик і п. Крачунеска серед рослин генеративної групи понад 35 % належать до найнижчого «с» класу віталітету. Збільшення у популяціях конкурентного типу особин низького рівня життєвості теж вказує на посилення ознак стрес-толерантного типу стратегії.

За іншої комбінації чинників (слабого стресу та сильних порушень) перебуває популяція на г. Шешул–Павлик. У таких умовах домінують ознаки конкурентного типу стратегії: висока щільність і дифузне розташування особин; велика частка ювенільних особин генеративного походження; частка особин генеративної групи лише трохи менша за прегенеративну; найвища, порівнюючи з іншими дослідженими популяціями, є й чисельність генеративних пагонів на одиницю площі; понад 50 % генеративних рослин належать до найвищого класу віталітету. Дослідження динаміки показників КРЗ (табл. 2) цієї популяції довело, що вони перебувають у межах діапазону, властивого рудеральному типу стратегії. Усе це в комплексі дозволяє віднести цю популяцію до К-R типу.

Як уже зазначалося, за сильного стресу та сильних порушень жодна популяція існувати не може [6]. Саме у таких умовах зростає популяція *G. lutea* на г. Ворожеска. У цьому оселищі відбувається втрата суцільного фітогенного поля та розпад популяції на окремі фрагменти. Змінюються й інші диференціальні параметри популяції, зокрема тип розташування особин є лише компактним; за період з 1970 рр. щільність зменшилася у 6 разів [6]; спостерігається глибоке омолодження до особин ювенільного стану; відсутні генеруючі рослини, а вегетативне розмноження відіграє значну роль у самопідтриманні популяції; серед усіх досліджених популяцій морфометричні параметри генеративних рослин є найнижчими (табл. 3), а віталітетна структура – депресивна. Отже, не зважаючи на посилення ознак стрес-толерантного типу, що забезпечують ще певний рівень стійкості цієї популяції, її стабільність вже порушена. Це відображається вже на інтегральних ознаках стратегії. Відповідно, зниження інтенсивності протікання процесів життєдіяльності у рослин призводить до поступової втрати території та до згасання популяції.

Морфометричні параметри генеративних рослин деяких досліджених популяцій *G. lutea*
(n =20, x ± SD)

Параметри	Місяця росту									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Ширина листка, см	12,0±2,9	10,0±3,3	15,5±5,0	17,4±4,3	14,9±3,8	17,2±5,1	10,7±3,5	14,9±3,5	17,8±4,9	16,1±4,6
Довжина листка, см	24,3±3,4	20,2±5,9	23,5±5,0	23,9±5,9	21,5±4,7	27,3±3,7	18,1±3,3	23,1±4,5	28,4±4,9	21,8±6,7
Площа листка, см ²	206,9±98,7	202,9±48,2	281,5±55,9	282,9±85,5	273,4±46,9	277,4±63,8	163,5±34,6	269,9±44,9	283,1±67,4	258,3±84,7
Кількість листків на один вегетативний пагін, шт.	5,2±1,4	6,5±0,8	7±1,2	5,5±1,8	5,2 ± 1,7	6,2±0,9	5,8±1,3	6,7±0,9	7,9±2	6,6±0,96
Діаметр вегетативного пагона, см	0,9±0,2	0,9±0,2	1,3±0,3	1,4±0,3	1,3±0,4	1,4±0,2	0,85±0,2	1,1±0,4	1,4±0,34	1,2±0,3
Кількість вегетативних пагонів, шт.	2,5±1,1	2,4±1,3	3±1,6	4,5±2,9	4,9 ± 1,5	5,6±3	2,3±1,3	3,9±2,3	2,5±0,97	2,4±1,2
Кількість генеративних пагонів	2,1±1,3	1,7±0,8	1,9±0,99	2,2±1,0	1,6±0,95	1,7±0,8	0	1,2±0,4	2,2±1,2	2,2±0,9
Діаметр генеративного пагона, см	1,6±0,4	1,2±0,3	1,6±0,1	1,5±0,27	1,3±0,2	1,6±0,4	–	1,3±0,3	1,5±0,3	1,5±0,3
Висота генеративного пагона, см	80,4±10,0	81,5±7,97	101,9±9,3	111,4±5,6	105,4 ±8,9	94,1±10,1	–	74,8±2,9	93,4±5,6	96±8,7
Кількість метамерів генеративного пагона, шт.	9,3±1,7	7,7±1,5	8,8±0,9	9,2±0,45	8,6±0,7	9,1±0,7	–	4,7±2,1	10±0,7	9,3±0,8
Довжина метамерів генеративного пагона, см	7,9±3,6	7,0±2,5	10,8±4,3	9,3±1,5	9,0±1,3	9,5±3,1	–	9,5±4,2	8,5±3,4	8,6±3,3
Кількість квіток в одному вузлі, шт.	21,6±9,0	21,1±3,0	27,7±10,6	23,7±8,9	24,7±6,9	31,4±16,8	–	18,6±7,4	21,9±10	22,3±8,6
Кількість квіток на один пагін, шт.	113±55,9	56,3± 29,7	130,2± 28,6	116,2±26,9	175,8± 76,1	173,8±9,2	–	86±31,8	123,7±29,3	110,6± 30,9
Кількість насіння у плоді, шт.	–	41,7± 17,8	61,4± 14,2	51,0± 12,8	36,9± 11,3	44,9± 26,9	–	–	43,3± 18,4	

Примітки: I – п. Лемська, II – п. Рогнеска, III – г. Шешул–Павлик, IV – г. Пожижевська, V – г. Менчул Квасівський, VI – г. Трояска–Татарука, VII – г. Ворожеска, VIII – п. Крачунеска, IX – г. Петрос Мармароський, X – г. Піп Іван Мармароський.

Аналіз стану штучних популяцій *G. lutea* показує, що лише лісовий локус популяції на г. Пожижевська характеризується ознаками стрес-толерантного типу та знаходиться на стадії згасання. Через значне вилучення сировини підірвало стійкість лучного локусу цієї популяції. Однак, до 2012 р. вона характеризувалася К-R типом стратегії. Саме такий тип на даний час властивий і для лучної частини агропопуляції на г. Пожижевська, яка характеризується низкою конкурентно-рудеральних ознак, а саме: відносно швидким захоплення нової території; у заміщенні поколінь домінуючою є роль генет; у віковій структурі значною є частка особин молодих вікових груп генеративного походження; понад 70,0 % генеративних особин належить до найвищого класу життєвості, а представники «с» групи особин у віталітетному спектрі відсутні; показники КРЗ знаходяться у межах діапазону, властивого конкурентному типу стратегії. Агропопуляція на г. Менчул Квасівський володіє К-S типом стратегії, на що вказує збільшення (до 42,0 %) частки особин найнижчого класу життєвості у віталітетному спектрі та її належність до врівноваженого якісного типу.

Необхідно зазначити, що популяції інших двох видів роду *Gentiana* – *G. punctata* та *G. acaulis* – з погляду просторової організації є метапопуляціями, що представлені системою часткових популяцій (або субпопуляцій), які періодично відмирають та поновлюються у певних частинах популяційного ареалу. Це відбувається завдяки існуванню невеликих

скупчень особин або окремих рослин, які й можуть засновувати нові субпопуляції. Така просторова організація цих видів значно посилює інтерес до процесів формування та занепаду їх субпопуляцій і змін поведінки щодо самопідтримання та виживання.

Аналіз стану рослин субпопуляцій виду *G. punctata* показує, що його особини мають значно меншу фітомасу та площу листової поверхні, як порівняти із видом *G. lutea*, меншими є показники його фактичної та потенційної насінневої продуктивності, що є ознаками стрес-толерантної стратегії. Водночас, як й *G. lutea*, цей таксон характеризується тривалим життєвим циклом і генеративним періодом. За сприятливих еколого-ценотичних умов росту у віковому спектрі його субпопуляцій високою є частка генеративних особин. Набір цих ознак наближає його до таксонів із конкурентним типом стратегії. Тому, на наш погляд, ймовірно, первинним типом стратегії виду *G. punctata* є К-S-тип.

Домінування ознак певного типу стратегії безпосередньо залежить від умов росту субпопуляції *G. punctata*, що підтверджують і результати наших досліджень. Так, субпопуляція на г. Піп Іван Мармароський знаходиться в умовах, що відповідають комбінації чинників: слабкий стрес – слабкі порушення. Це спричинює високу щільність особин, дифузний характер їхнього розташування в просторі, переважання генеративного типу самопідтримання, неглибоке вегетативне омолодження. Такий набір диференціальних ознак властивий видам із конкурентним типом стратегії. Однак, згідно із результатами аналізу морфометричних параметрів генеративних рослин, представлених у таблиці 4, рослини *G. punctata* у цьому локалітеті не характерний потужний розвиток вегетативної та генеративної сфер. Аналіз вікової структури популяції свідчить про перевагу в їх віковому спектрі особин прегенеративної групи, а серед генеративних рослин 36,0 % припадає на особини найнижчого рівня життєвості, що визначає приналежність субпопуляції за якістю до врівноваженого типу. Це є ознакою стрес-толерантного типу стратегії. Водночас, значна репродуктивну здатність, про що свідчить висока кількість генеративних пагонів на одиницю площі та значна частка ювенільних особин на порушених ділянках ґрунту (свиноритвинах), є індикаторами рудерального типу стратегії. Отже, у цьому локалітеті субпопуляція *G. punctata* характеризується потрійним типом стратегії – К-S-R.

У субпопуляцій на г. Брескул, г. Говерла, г. Гутин Томнатик, що перебувають в умовах сильного стресу і слабких порушень, домінують ознаки стрес-толерантної стратегії. Це супроводжується зниженням щільності рослин до 0,6–0,05 ос./м², їх компактно-дифузним або компактним розташуванням, переважанням віргінільних особин вегетативного походження у віковому спектрі, збільшенням ролі рамет у заміщенні поколінь, глибоким омолодженням особин. Проте, у супопуляціях на г. Брескул і г. Говерла рослини характеризуються найбільш потужним розвитком надземних органів (табл. 4); частка особин найвищого класу віталітету становить 38,0 %, а за якісним типом часткова популяція на г. Брескул належить до процвітаючих. Цей набір ознак вказує на домінування конкурентного типу стратегій у цих субпопуляціях.

Як й у випадку із *G. lutea*, часткові популяції, що знаходяться в умовах сильного стресу і сильних порушень (г. Татул, г. Ворожеска), є стрес-толерантами на стадії згасання. У віковому спектрі цих субпопуляцій переважають віргінільні особини вегетативного походження, відсутні ювенільні рослини (г. Ворожеска) та високою є частка особин постгенеративної групи. Щільність рослин у цих субпопуляціях є низькою, особливо на г. Ворожеска; розташування особин у просторі відбувається за компактним (г. Ворожеска) і компактно-дифузним (г. Татул) типом. У субпопуляції на г. Ворожеска домінує вегетативний тип самопідтримання, а процеси глибокого омолодження особин спостережено в обох часткових популяцій. Найнижчими серед досліджених субпопуляцій у рослин цих локалітетів є й морфометричні параметри (табл. 4), що відображається на їхньому віталітетному спектрі, у якому на частку особин «с» класу припадає 70,0–80,0 %. Усе це в комплексі зі значною фрагментацією субпопуляцій вказує на їхнє поступове згасання.

Морфометричні параметри генеративних рослин деяких досліджених популяцій *G. punctata* і *G. acaulis* (n =20, x ± SD)

Параметри	Місяця росту									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Ширина листка, см	5,3±1,3	5,2±1,4	5,1±1,8	5,0±1,9	4,0±0,7	1,9±0,6	1,5±0,6	1,7±0,5	1,7±0,5	1,9 ±0,5
Довжина листка, см	18,3±3,8	12,5±2,4	11,8±3,5	11,4±2,9	12,7±2,2	3,8±1,3	3,4±1,5	3,6±1,5	3,7±1,6	3,9±1,4
Площа листка, см ²	65,4±21,8	47,1±18,8	38,7±13,9	33,8±9,8	32,1±9,7	9,6±2,9	9,3±2,5	9,4±2,3	9,4±1,0	11,6±1,4
Кількість листків на один вегетативний пагін, шт.	5,9±1,4	5,9±1,1	5,5±1,4	5,1±1,1	4,8±0,9	10±1,9	10,1±2,6	9,6±2,1	7,1±1,4	9,8±1,6
Діаметр вегетативного пагона, см	0,83±0,15	0,75±0,1	0,69±0,1	0,59±0,1	0,5±0,1	11±8,3	11,3±7,8	13,0±10	6,9±4,3	12,9 ±3,7
Кількість вегетативних пагонів, шт.	7,3±6,5	4,3±2,2	4,1±2,3	2±0,8	5,9±3,4	–	–	–	–	–
Кількість генеративних пагонів, шт	3,2±2,0	2,5±1,5	2,7±1,3	1,7±0,7	2,9±1,4	–	–	–	–	–
Діаметр генеративного пагона, см	0,9±0,3	0,6±0,09	0,7±0,2	0,7±0,1	0,6±0,4	–	–	–	–	–
Висота генеративного пагона, см	37,9±8,3	33±7,2	35,8±7,4	30,5±3,7	31,8±6,0	–	–	–	–	–
Кількість метамерів генеративного пагона, шт.	5,1±0,8	4,0±0,8	4,3±0,9	4,0±1,1	4,1±1,0	–	–	–	–	–
Довжина метамерів генеративного пагона, см	7,7±3,8	7,9±4,1	7,9±4,2	5,9±2,8	6,0±2,9	–	–	–	–	–
Кількість квіток в одному вузлі, шт.	4,8±1,5	4,2±2,0	4,9±2,2	3,7±1,9	3,6±1,7	–	–	–	–	–
Кількість квіток на один пагін/рослину, шт.	8,6±0,7	8,5±1,1	8,6±0,9	7,4±1,2	7,2±0,9	4,5±3,4	3,4±2,0	4,1±2,8	1,4±0,5	3,3±1,7
Діаметр ортотропної частини квітконосного пагона, см	–	–	–	–	–	0,2±0,05	0,2±0,07	0,2±0,06	0,2±0,04	0,2±0,05
Довжина ортотропної частини квітконосного пагона, см	–	–	–	–	–	5,4±1,1	5,1±2,5	6,4±3,0	5,0±1,4	5,5±1,4
Довжина коробочки, см	–	–	–	–	–	5,3±0,5	4,8±1,1	5,5±1,0	4,6±0,6	4,8±0,6

Примітки: I – г. Брескул, II – г. Говерла, III – г. Піп Іван Мармароський, IV – г. Татул, V – г. Ворожеска, VI – г. Ребра, VII – г. Туркул, VIII – г. Говерла, IX – г. Петрос, X – г. Брескул.

Отримані результати наших досліджень щодо стратегії субпопуляцій *G. punctata* дещо суперечать висновкам Й.В. Царика із співавторами [5], які зазначають існування у цього таксону лише ознак стрес-толерантного типу.

Щодо виду *G. acaulis*, то за особливістю біології та комплексом диференціальних ознак групового рівня його також складно віднести до конкретного типу первинної стратегії. Так,

рослинам цього таксону характерні відносно мала фітомаса та площа листкової поверхні; вони продукують значно менше насіння, порівнюючи з іншими дослідженими видами. Навіть помірний випас або витоптування можуть спричинювати перехід рослин *G. acaulis* у квазисенільний стан, що супроводжується тимчасовою зміною лівостороннього спектру на правосторонній. Це дозволяє, на перший погляд, віднести вид *G. acaulis* до групи рослин із первинним стрес-толерантним типом стратегії. Однак, дослідження показують, що для цього таксону не характерна мала вегетативна рухомість; рано вони приступають й до вегетативного та генеративного розмноження. Цей комплекс ознак властивий групі рослин вже із рудеральним типом первинної стратегії. До аналогічних висновків дійшли й К.М. Малиновський із співавторами (2004), аналізуючи поведінку рослин *G. acaulis* в умовах заростання його локалітетів *Achillea millefolium* L., *Phyteuma vagneri* A. Kerner, *Leontodon croceus* Haenke та за значної кількості генеративних особин *Ligusticum mutellina* (L.) Crantz і *Vaccinium myrtillus* [3]. Цими авторами було встановлено, що вплив *G. acaulis* на популяції інших видів рослин є незначним [3]. Однак, його особини здатні відносно швидко займати вивільнені місця з послабленою конкуренцією та швидко звільняти нішу вже за незначних змін середовища і фітогенного впливу [3]. Результати цих досліджень дозволили К.М. Малиновському із співавторами (2004) віднести цей вид до перехідного експлерентно-патієнтного [3] або, згідно з класифікацією Й. В. Царика із співавторами [5], до S-R типу.

Результати наших досліджень показують, що протягом останнього десятиліття субпопуляції на г. Говерла, Туркул, Ребра перебувають в умовах дії сильного стресу та сильних порушень. Відомо, що у таких умовах популяції стрес-толерантного типу згасають [5]. Аналіз динаміки диференціальних параметрів цих субпопуляцій підтверджує ці висновки. Так, за період досліджень відбувалася низка негативних змін, а саме: значно знизилася щільність особин; вікові спектри стали неповночленними, оскільки з їхнього складу зникли не лише особини постгенеративної групи, але й ювенільні та, у випадку реберської субпопуляції, й старі генеративні рослини; значна частка рослин завершує свій життєвий шлях ще на прегенеративному періоді; збільшилася у понад 2 рази частка особин найнижчого класу віталітету, а за індексом якості субпопуляція на г. Ребра з процвітаючої перейшла у категорію депресивних. До цієї групи популяцій із врівноваженого типу перейшла й субпопуляція на г. Туркул. При цьому необхідно зазначити, що рослини з г. Ребра все ще характеризуються найбільш потужним розвитком надземної сфери, на що вказує аналіз їх морфометричних параметрів (табл. 4). Домінування у частковій популяції на г. Говерла середньовікових генеративних особин свідчить про тенденцію до старіння. Така зміна вікової структури є посиленням ознак стрес-толерантності.

В умовах слабого стресу – сильних порушень перебуває субпопуляція на г. Петрос Мармароський. Такі умови росту супроводжуються збільшенням ролі вегетативного розмноження у самопідтриманні популяції та частки особин (до 76,0 %) найнижчого класу віталітету, що вказує на посилення ознак стрес-толерантного типу стратегії.

Умови існування локалітету на г. Брескул не можна однозначно класифікувати, оскільки в кожний конкретний проміжок часу субпопуляція, залежно від ступеня рекреаційного навантаження на неї, може зазнавати слабкий або сильний стрес та, відповідно, піддаватися слабким або сильним порушенням. За такого епізодичного антропогенного впливу у віталітетному спектрі цієї субпопуляції зберігається ще достатньо висока частка особин найвищого класу віталітету, а за якісним індексом субпопуляція належить до процвітаючого типу. Це вказує на існування внутрішніх механізмів, здатних забезпечувати ще значний рівень стабільності та стійкості в субпопуляції. До таких механізмів належить інтенсифікація вегетативного розмноження впродовж періоду досліджень, що певною мірою компенсує втрати врожаю насіння та зниження вдвічі частки ювенільних рослин генеративного походження. Збільшення рослинами інвестицій ресурсів у формування рамет зменшує потенціал щодо формування генеративних органів та насіння, що позначається на генеративному розмноженні [9]. Водночас, такі зміни вказують на посилення проявів ознак стрес-толерантного типу у цій субпопуляції.

Висновки

Отже, отимані результати показали, що досліджені нами види характеризується різними типами первинних стратегій. Відповідно, таксон *G. lutea* належить до К-стратегів, *G. punctata* – до К-S-типу, а *G. acaulis* – до S-R-типу. Проте тривала антропогенна трансформація високогірних ценозів Українських Карпат призвела до того, що навіть в умовах слабого стресу та слабких популяціям цим видам уже не властиві первинні типи стратегій. За такої комбінації факторів популяції *G. lutea* набувають К-S-типу (п. Лемська) або К-R –типу (г. Піп Іван Мармароський), *G. punctata* – К-S-R-типу (г. Піп Іван Мармароський), а *G. acaulis* – S-типу (г. Брескул) стратегій. В умовах дії слабого стресу та сильних порушень стратегія виду *G. lutea* змінюється на К-R-тип (гг. Шешул–Павлик), а у субпопуляції *G. acaulis* (г. Піп Іван Мармароський) посилюються ознаки стрес-толерантного типу.

Більшість популяцій досліджених видів *G. lutea* (п. Рогнеска, гг. Трояска–Татарука, п. Крачунеска, г. Петрос Мармароський, г. Гутин Томнатик) та *G. punctata* (г. Брескул, г. Говерла, г. Гутин Томнатик) перебувають в умовах сильного стресу та слабких порушень. У таких умовах в обох видів значно посилюється прояв ознак стрес-толерантного типу стратегії.

Нами встановлено, що в умовах сильного стресу та сильних порушень у популяціях усіх видів також посилюється прояв ознак стрес-толерантного типу стратегії. Однак, елімінація особин призводить до зниження їх щільності, зменшення популяційного ареалу та, відповідно, поступового згасання популяцій. Саме це спостережено чи зафіксовано в оселищі виду *G. lutea* на г. Ворожеска, у місцях росту таксону *G. punctata* на г. Татул і г. Ворожеска, а також у локалітетах виду *G. acaulis* на гг. Говерла, Туркул, Ребра.

1. Бедей М. І., Кризь О. П., Волощук М. І., Маханець І. А. Тирлич жовтий (*Gentiana lutea* L.) в Українських Карпатах. Ужгород : ПП «Повч Р.М», 2010. 132 с.
2. Вайнагій І. В., Вайнагій В. І. Насінна продуктивність деяких трав'янистих рослин Українських Карпат, занесених до Червоної книги України. *Український ботанічний журнал*. 1993. Т. 50, № 6. С. 23–32.
3. Внутрішньопопуляційна різноманітність рідкісних, ендемічних і реліктових видів рослин Українських Карпат. / за ред. М. Голубця, К. Малиновського. Львів : Поллі, 2004. 198с.
4. Злобін Ю. А. Комп'ютерні програми для аналізу популяцій рослин. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Агрономія і біологія»*. 2012. Вип. 2 (23). С. 3–6.
5. Стратегія популяцій рослин у природних і антропогеннозмінених екосистемах Карпат / за ред. М. Голубця, Й. Царика. Львів : Євросвіт, 2001. 160 с.
6. Структура популяцій рідкісних видів флори Карпат / Малиновський К. А., Царик Й. В., Жиляєв Г. Г. та ін. Київ : Наукова думка, 1998. 176 с.
7. Cornwell W.K., Cornelissen J.H.C., Amatangelo K., Dorrepaal E., Eviner V.T., Godoy O. *et al.* Plant species traits are the predominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide. *Ecology Letters*. 2008. Vol. 11. P. 1065–1071.
8. Díaz S., Kattge J., Cornelissen J.H.C., Wright I.J., Lavorel S., Dray S. *et al.* The global spectrum of plant form and function. *Nature*. 2016. Vol. 529. P. 167–171.
9. Dostál P. Reproductive strategies of native plant populations altered by a plant invasion. *Functional Ecology*. 2023. 00:1–11.
10. Franklin J., Serra-Diaz J. M., Syphard A. D., Regan H. M. Big data for forecasting the impacts of global change on plant communities. *Global Ecol. Biogeogr.* 2017. Vol. 26. P. 6–17. doi: 10.1111/geb.12501.
11. MacArthur J.W. Environmental fluctuations and species diversity / Ecology and evolution of communities. Belknap, Cambridge, Massachusetts, 1975. P. 74–80.
12. Pennington L. K., Slatyer R. A., Ruiz-Ramos D. V., Veloz S. D., Sexton J. P. How is adaptive potential distributed within species ranges? *Evolution*. 2021. Vol. 75. P. 2152–2166.
13. Pierce S., Brusa G., Vagge I., Cerabolini B.E.L. Allocating CSR plant functional types: the use of leaf economics and size traits to classify woody and herbaceous vascular plants. *Functional Ecology*. 2013. Vol. 27. P. 1002–1010.
14. Pierce S., Negreiros D., Cerabolini B. E. L., Kattge J., Diaz S. A global method for calculating plant CSR ecological strategies applied across biomes world-wide. *Functional Ecology*. 2017. Vol. 31, Iss. 2. P. 444–457.
15. Reich P.B. The world-wide 'fast-slow' plant economics spectrum: a traits manifesto. *Journal of Ecology*. 2014. Vol. 102. P. 275–301.

16. Shay J. E., Pennington L. K., Mandussi Montiel-Molina J. A., Toews D. J. Hendrickson B. T., Sexton J. P. Rules of Plant Species Ranges: Applications for Conservation Strategies. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2021. 9:700962. doi: 10.3389/fevo.2021.700962.
17. Soudzilovskaia N. A., Elumeeva T. G., Onipchenko V. G., Shidakov I. I., Salpagarova F. S., Khubiev A. B. et al. Functional traits predict relationship between plant abundance dynamic and long-term climate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2013. Vol. 110. P. 18180–18184.
18. Van Bodegom P. M., Douma J. C., Witte J.P.M., Ordoñez J. C., Bartholomeus R. P., Aerts R. Going beyond the limitations of plant functional types when predicting global ecosystem-atmosphere fluxes: exploring the merits of traits-based approaches. *Global Ecology and Biogeography*. 2012. Vol. 21. P. 625–636.

References

1. Bedei M. I., Krys O. P., Voloshchuk M. I., Makhnats I. A. Tyrlych zhovtyi (*Gentiana lutea* L.) v Ukrainykh Karpatakh. Uzhhorod : PP «Povch R.M», 2010. 132 s. [in Ukrainian]
2. Vainahii I. V., Vainahii V. I. Nasinna produktyvnist deiakykh travianystykh roslyn Ukrainykh Karpat, zanesenykh do Chervonoï knyhy Ukrainy. *Ukrainskyi botanichnyi zhurnal*. 1993. T. 50, No 6. S. 23–32 [in Ukrainian]
3. Vnutrishnopoluliatsiina riznomanitnist ridkisnykh, endemichnykh i reliktovykh vydiv roslyn Ukrainykh Karpat. / za red. M. Holubtsia, K. Malynovskoho. Lviv: Polli, 2004. 198 s. [in Ukrainian]
4. Zlobin Yu. A. Kompiuterni prohramy dlia analizu populiatsii roslyn. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Serii «Ahronomiia i biolohiia»*. 2012. Vyp. 2 (23). S. 3–6 [in Ukrainian]
5. Stratehiia populiatsii roslyn u pryrodnykh i antropohennozminenykh ekosystemakh Karpat / za red. M. Holubtsia, Y. Tsaryka. Lviv : Ievrosvit, 2001. 160 s. [in Ukrainian]
6. Struktura populiatsii ridkisnykh vydiv flory Karpat / Malynovskiy K. A., Tsaryk Y. V., Zhylyaiiev H. H. ta in. Kyiv : Naukova dumka, 1998. 176 s. [in Ukrainian]
7. Cornwell W.K., Cornelissen J.H.C., Amatangelo K., Dorrepaal E., Eviner V.T., Godoy O. *et al.* Plant species traits are the predominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide. *Ecology Letters*. 2008. Vol. 11. P. 1065–1071.
8. Díaz S., Kattge J., Cornelissen J.H.C., Wright I.J., Lavorel S., Dray S. *et al.* The global spectrum of plant form and function. *Nature*. 2016. Vol. 529. P. 167–171.
9. Dostál P. Reproductive strategies of native plant populations altered by a plant invasion. *Functional Ecology*. 2023. 00:1–11.
10. Franklin J., Serra-Diaz J. M., Syphard A. D., Regan H. M. Big data for forecasting the impacts of global change on plant communities. *Global Ecol. Biogeogr.* 2017. Vol. 26. P. 6–17. doi: 10.1111/geb.12501.
11. MacArthur J.W. Environmental fluctuations and species diversity / Ecology and evolution of communities. Belknap, Cambridge, Massachusetts, 1975. P. 74–80.
12. Pennington L. K., Slatyer R. A., Ruiz-Ramos D. V., Veloz S. D., Sexton J. P. How is adaptive potential distributed within species ranges? *Evolution*. 2021. Vol. 75. P. 2152–2166.
13. Pierce S., Brusa G., Vagge I., Cerabolini B.E.L. Allocating CSR plant functional types: the use of leaf economics and size traits to classify woody and herbaceous vascular plants. *Functional Ecology*. 2013. Vol. 27. P. 1002–1010.
14. Pierce S., Negreiros D., Cerabolini B. E. L., Kattge J., Diaz S. A global method for calculating plant CSR ecological strategies applied across biomes world-wide. *Functional Ecology*. 2017. Vol. 31, Iss. 2. P. 444–457.
15. Reich P.B. The world-wide ‘fast-slow’ plant economics spectrum: a traits manifesto. *Journal of Ecology*. 2014. Vol. 102. P. 275–301.
16. Shay J. E., Pennington L. K., Mandussi Montiel-Molina J. A., Toews D. J. Hendrickson B. T., Sexton J. P. Rules of Plant Species Ranges: Applications for Conservation Strategies. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2021. 9:700962. doi: 10.3389/fevo.2021.700962.
17. Soudzilovskaia N. A., Elumeeva T. G., Onipchenko V. G., Shidakov I. I., Salpagarova F. S., Khubiev A. B. *et al.* Functional traits predict relationship between plant abundance dynamic and long-term climate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2013. Vol. 110. P. 18180–18184.
18. Van Bodegom P. M., Douma J. C., Witte J.P.M., Ordoñez J. C., Bartholomeus R. P., Aerts R. Going beyond the limitations of plant functional types when predicting global ecosystem-atmosphere fluxes: exploring the merits of traits-based approaches. *Global Ecology and Biogeography*. 2012. Vol. 21. P. 625–636.

¹L. R. Hrytsak, ²V. G. Kyryak, ³D. A. Boyko, ¹N. M. Drobyk

¹Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine

²Institute of Carpathian Ecology, National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine

³Lviv National University of Environmental Management, Ukraine

TRANSFORMATION OF PRIMARY STRATEGIES OF SPECIES OF THE GENUS *GENTIANA* L. IN HIGHLAND CENOSES OF THE UKRAINIAN CARPATHIANS

The study presents an analysis of changes in differential (ontogenetic, age-related, spatial, vital structural, and self-supporting) and integral (recovery index, strategy type) characteristics of population strategies in rare alpine species of the genus *Gentiana* L. (*Gentiana lutea* L., *Gentiana punctata* L., *Gentiana acaulis* L.). These species grow in the Ukrainian Carpathians under varying degrees of pastoral and recreational pressure, soil silting, and sodification.

The results demonstrate that the studied species exhibit distinct primary strategy types: *G. lutea* is classified as a K-strategist, *G. punctata* belongs to the K-S-type, and *G. acaulis* to the S-R-type. Long-term anthropogenic transformation of the high-altitude ecosystems in the Ukrainian Carpathians has weakened the manifestation of these primary strategy types. Under protected conditions, where *G. lutea* populations experience low stress and minimal disturbance, they tend to acquire characteristics of the K-S-type (Lemska) or K-R-type (Pip Ivan Marmarosky). The primary strategy of *G. punctata* shifts to K-S-R-type (Pip Ivan Marmarosky), while *G. acaulis* transitions to an S-type strategy (Breskul).

When optimal abiotic and phytocoenotic conditions are maintained but biomass extraction from the population increases, the strategy of *G. lutea* shifts to K-R-type (Sheshul-Pavlik), while stress-tolerant traits become more pronounced in the *G. acaulis* subpopulation (Pip Ivan Marmarosky).

Our findings indicate that under severe stress and high disturbance, characterized by intensified silting and soil sodification, combined with increased biomass removal, populations of all species exhibit a heightened stress-tolerant strategy. This process leads to a gradual decline in plant density, a reduction in population range, and ultimately, progressive population decline. These trends have been documented in the *G. lutea* habitat on Vorozheska Mountain, in *G. punctata* habitats on Tatul and Vorozheska Mountains, as well as in *G. acaulis* populations on Hoverla, Turkul, and Rebra Mountains.

Key words: species of the genus *Gentiana* L., types of ecological strategies of plant populations, Ukrainian Carpathians.

Надійшла 22.11.2024.

ФІЗІОЛОГІЯ РОСЛИН

УДК 581.112:631.8]:635.657

doi: 10.25128/2078-2357.24.3–4.8

І. В. ЧЕРНІК

Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка
вул. М. Кривоноса, 2, Тернопіль, 46027
e-mail: igor77cheri@gmail.com

ПАРАМЕТРИ ВОДООБМІНУ ЛИСТКІВ НУТУ ЗВИЧАЙНОГО (*CICER ARIETINUM* L.) ЗА ВПЛИВУ МІКРОБНИХ ПРЕПАРАТІВ

У статті представлено результати дослідження впливу передпосівної обробки насіння бактеріальною суспензією селекціонованого штаму *Mesorhizobium ciceri* ND-64 (БС) та комплексним мікробним препаратом Ризогумін на показники водообміну листків нуту звичайного (*Cicer arietinum* L.) сорту Скарб за вирощування у ґрунтово-кліматичних умовах Західного Лісостепу України (Тернопільська область). Встановлено, що мікробні препарати та кліматичні чинники впливають на параметри водного режиму рослин нуту звичайного. У фазі цвітіння, початок утворення бобів тканини листків рослин усіх варіантів характеризувалися найбільшим умістом води упродовж досліджуваного періоду. Статистично вірогідний показник загального вмісту води в листках визначено за впливу інокуляції БС у фазі вегетації та Ризогуміном під час цвітіння, початок утворення бобів.

Упродовж онтогенезу обробка насіння перед сівбою мікробними препаратами знижувала показники водного дефіциту та підвищувала водоутримувальну здатність тканин листків нуту звичайного. У фазах цвітіння, початок утворення бобів і зеленого бобу визначено статистично вірогідне зниження водного дефіциту листків за впливу мікробних препаратів на 19,0 % та 37,5 % (БС) і 25,0 % та 32,3 % (Ризогумін) і підвищення їх водоутримувальної здатності. Через 2 год після випаровування води листки *Cicer arietinum* втратили на 11,0 % (БС) та 37,4 % (Ризогумін), через 4 год – на 19,3 % (БС) та 39,7 % (Ризогумін), через 24 год – на 21,2 % (БС) та 41,5 % (Ризогумін) її менше. У фазі зеленого бобу за більш тривалого зневоднення (через 4 та 24 год) листки дослідних рослин статистично вірогідно з більшою силою утримували воду й на 21,5 % та 13,6 % (БС) і 27,2 % та 16,6 % (Ризогумін) менше її втрачали порівняно з контролем.

Зменшення показників водного дефіциту листків та підвищення їх водоутримувальної здатності вказує на вищу посухостійкість рослин нуту звичайного сорту Скарб за обробки насіння бактеріальною суспензією *Mesorhizobium ciceri* ND-64 та комплексним мікробним препаратом Ризогумін.

Ключові слова: *Cicer arietinum* L., інокуляція, водний дефіцит, водоутримувальна здатність, мікробні препарати.

Характерною ознакою сьогодення є інтенсивні зміни кліматичних умов, які суттєво впливають на природну та культивовану флору. У 2023 році було зафіксовано рекордні температури у світі. Влітку цього ж року в Європі екстремальні хвилі спеки вплинули на південну половину континенту, а в деяких регіонах температура повітря перевищила 45°C. Варто зазначити, що в Європі повітря нагрівається вдвічі швидше, як порівняти з середніми показниками температури у світі. У результаті столітнього спалювання викопного палива Європа стикається з

безпрецедентним потеплінням та ескалацією екстремальних кліматичних явищ, підкреслених рекордною спекою, посухами та повенями у 2022 та 2023 роках [23].

Сільське господарство вразливе до зміни клімату та зазнає значних економічних втрат [15]. Фермери можуть адаптуватися до зміни клімату, вживаючи заходів у власному масштабі, завдяки впровадженню нових практик [21]. Зазначені процеси відомі в літературі як приватна адаптація, пов'язані з пристосуваннями, які фермерські господарства можуть вжити на своєму рівні від інтенсивного (зокрема, зміна попиту на фактори виробництва) та екстенсивного шляхів (наприклад, зміна у виборі культури) до прийняття нових практик (наприклад, агролісомеліорація), більш сприятливих до зміни кліматичних умов [22]. Аналізуючи розвиток європейського сільського господарства, прогнозують, що кліматичні зміни можуть мати негативні наслідки в середньостроковій та позитивні – у довгостроковій перспективі [20], а врожайність культурних рослин в умовах зміни клімату в результаті адаптації може зрости від 7 до 15 % [17].

Одним із сучасних шляхів адаптації сільського господарства до природних умов є впровадження нових для регіону посухостійких культур, які є цінними у плані харчування та використання на корм тваринам, із новими елементами технології вирощування, що сприятимуть формуванню їх високих урожаїв, будуть безпечними для вживання та навколишнього середовища.

Перспективною посухо- та жаростійкою культурою, що може переносити спеку та повітряну посуху, є нут звичайний (*Cicer arietinum* L.) [2, 9, 10, 11]. Це третя за значимістю бобова культура у світі після квасолі, яка широко культивується та споживається. Попит на насіння нуту, що складається на 80 % з вуглеводів, багате білками, харчовими волокнами, вітамінами та мінеральними речовинами, зумовлений харчовою цінністю компонентів його хімічного складу і відтак суттєво впливає на показники виробництва [19]. Нут як бобова культура в прохолодну пору року є основним джерелом білків спеціально для населення у країнах, що розвиваються [14].

Варто зазначити, що нут звичайний за впливу теплового стресу, особливо під час репродуктивної фази росту і розвитку, знижує насінневу продуктивність [12]. Температура понад 27°C негативно впливає на ріст листків, а понад 30°C зменшує плодючість репродуктивних органів нуту. Зниження урожайності вперше спостерігали за температури нижчої за 32°C у генотипі, чутливому до спеки, і за 34°C – у генотипі, стійкому до спеки, після 12 год стресу [18].

На продуктивність культури суттєво впливають елементи технології вирощування. Нині велику увагу приділяють екологічно безпечним препаратам, зокрема бактеріальним [13]. Оскільки територія України знаходиться в різних ґрунтово-кліматичних зонах, тому нут звичайний потребує детального розроблення та дослідження технологій вирощування [3], встановлення їх впливу на фізіологічні показники. Сьогодні вплив мікробних препаратів на параметри водообміну рослин нуту звичайного в умовах Західного Лісостепу України досліджений недостатньо, тому це питання заслуговує на увагу.

Метою роботи було дослідити вплив бактеріальної суспензії селекціонованого штаму *Mesorhizobium ciceri* ND-64 (БС) та комплексного мікробного препарату Ризогумін на показники водообміну листків нуту звичайного.

Матеріали та методи досліджень

У дослідженні використовували нут звичайний сорту Скарб, який характеризується високою стійкістю до посухи та до хвороб, є крупнонасінним, високоврожайним і середньостиглим (тривалість вегетаційного періоду 88-93 діб). Насіння світло-жовте, проміжної форми, поверхня морщиниста. У насінні накопичується до 30 % білка та до 7 % олії. Має добрі смакові якості та швидко розварюється. Сорт рекомендований для Степу та Лісостепу, відноситься до середземноморського підвиду (subsp. *mediterraneum* G. Pop.), тип *Kabuli*, різновидність іспанко-флавесценс, субрізновидність пірокарпум (*hispanico-flavescens* subvar. *pirocarpum* G. Pop.) [4]. Насіння нуту звичайного сорту Скарб отримали із Селекційно-генетичного інституту – Національного центру насіннезнавства та сортовивчення (м. Одеса).

Дослідження проводили упродовж 2021–2024 років на чорноземі типовому важкосуглинному агробіологічній лабораторії Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка (ТНПУ) у трьох варіантах та чотирьох повтореннях. Насіння нуту звичайного контрольного варіанту (К) перед сівбою зволожували водою з водогону із розрахунку 2 % від його маси, а дослідних – рідкими формами бактеріальної суспензії селекціонованого штаму *Mesorhizobium ciceri* ND-64 (БС) та Ризогуміну згідно з нормами виробника. Мікробні препарати отримали з Інституту сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН України (м. Чернігів). Технологія вирощування культури нуту звичайного типу для Лісостепу України (норма висіву – 400 тис. насінин на 1 га, ширина міжрядь 45 см, глибина сівби – 3–4 см, строк сівби – друга половина квітня) [8].

Упродовж вегетації нуту звичайного визначали загальний уміст води у листках, їх водоутримувальну здатність за А. Арландом та водний дефіцит у лабораторії фізіології рослин і мікробіології [1]. Статистичну обробку результатів дослідження здійснювали за допомогою комп'ютерної програми *Microsoft Excel*.

Результати досліджень та їх обговорення

Вода в організмі рослини є необхідним середовищем і безпосереднім учасником всіх фізіолого-біохімічних процесів. Її вміст у тканинах є величиною динамічною і непостійною, залежить від віку тканини й органу, його топографії, інтенсивності протікання фізіологічних процесів, доступності ґрунтової вологи, а також від співвідношення кількості поглинутої і втраченої води [1]. У результаті досліджень встановлено, що інокуляція насіння нуту звичайного перед сівбою БС та Ризогуміном сприяла підвищенню загального вмісту води у листках рослин упродовж їх онтогенезу (табл. 1). Під час фази вегетації статистично вірогідний показник вмісту води у листках рослин виявлено за впливу Ризогуміну, що на 3,2 % більше, порівнюючи з контролем.

Таблиця 1

Вплив мікробних препаратів на вміст води (%) в листках нуту звичайного сорту Скарб,
 $M \pm m, n=6$

Варіант	Фаза росту і розвитку рослин		
	вегетації* ¹	цвітіння, початок утворення бобів* ²	зелений біб* ³
Контроль	75,82±0,51	76,73±0,56	76,12±0,40
БС	76,46±0,49	79,36±0,56*	78,06±0,85
Ризогумін	78,23±0,37*	78,92±0,78	75,44±0,25

Примітки: * відмінност, порівнюючи з контролем, вірогідні при $P \leq 0,05$;

*¹ – температура повітря – 20°C, вологість = 60 %, сила вітру – 6,7 км/год;

*² – температура повітря – 25°C, вологість = 57 %, сила вітру – 5 км/год;

*³ – температура повітря – 21°C, вологість = 55 %, сила вітру – 12 км/год.

Під час цвітіння, початок утворення бобів виявлено тенденцію до більшого обводнення (на 2,8 %) листків нуту звичайного за впливу Ризогуміну, порівнюючи з контролем, та на 0,9 %, порівнюючи з фазою вегетації. Тканини листків рослин зазначеного варіанту у фазі зеленого бобу характеризувалися нижчим умістом води на 0,9 % порівнюючи з контролем і на 3,6 % та 4,6 %, порівнюючи з фазами вегетації та цвітіння, початок утворення бобів.

Передпосівна інокуляція БС статистично вірогідно, порівнюючи з контролем, підвищувала (на 3,4 %) обводнення листків нуту звичайного сорту Скарб у фазі цвітіння, початок утворення бобів. Саме у цій фазі росту і розвитку рослин тканини листків усіх варіантів характеризувалися найбільшим умістом води упродовж досліджуваного періоду. У фазі зеленого бобу показник умісту води в листках за впливу БС дещо знизився (на 2,1 %), порівнюючи з попередньою фазою, але був вищим на 2,1 %, порівнюючи з фазою вегетації, та

на 2,5 % –порівнюючи з контролем. Зменшення обводнення листків, очевидно, можна пояснити нижчою вологістю повітря, більшою силою вітру та початком старіння листків.

Водний дефіцит є важливим параметром, що характеризує водний режим рослин. Він суттєво залежить від природних чинників, що спричиняють посуху, спостерігається за різкого зниження вологості та підвищення температури повітря, відтак це призводить до підвищення температури рослин та втрати ними води [7]. Для подолання водного дефіциту культурні рослини формують складні механізми стійкості та адаптації, включаючи біохімічні та фізіологічні реакції [16]. Результатом пристосування рослин до дефіциту води є зменшення листової поверхні, продихової транспірації, збільшення співвідношення підземної та наземної частини [5]. Одним із важливих механізмів посухостійкості культур і зниження їх водного дефіциту є осмотичне регулювання, що реалізується через зниження осмотичного потенціалу за рахунок накопичення неорганічних і органічних осмолітів (аланіну, валіну, проліну, тощо) [7].

Встановлено, що передпосівна обробка насіння нуту звичайного мікробними препаратами суттєво впливала на показники водного дефіциту рослин упродовж їх онтогенезу (табл. 2). У фазі вегетації листки рослин дослідних варіантів характеризувалися на 14,4 % (БС) та 15,5 % (Ризогумін) меншими показниками дефіциту води. Варто зазначити, що в цій фазі росту і розвитку рослин вологість повітря була найвищою (60 %), порівнюючи з іншими фазами, що відповідно вплинуло на показники водного дефіциту листків усіх варіантів. У зазначений період досліджувані параметри були в 2,1 (цвітіння, початок утворення бобів) та 2,8 (зелений біб) (варіант Контроль), відповідно 2,0 та 2,1 (БС), 1,9 та 2,3 (Ризогумін) рази меншими, порівнюючи з наступними фазами росту та розвитку рослин. У фазі цвітіння, початок утворення бобів визначено статистично вірогідне зниження водного дефіциту за впливу мікробних препаратів на 19,0 % (БС) та 25,0 % (Ризогумін). Аналогічну закономірність визначено і у фазі зеленого бобу: 37,5 % (БС) та 32,3 % (Ризогумін).

Таблиця 2

Вплив мікробних препаратів на водний дефіцит (%) листків нуту звичайного сорту Скарб,
 $M \pm m, n=6$

Варіант	Фаза росту і розвитку рослин		
	вегетації* ¹	цвітіння, початок утворення бобів* ²	зелений біб* ³
Контроль	8,24±0,18	17,22±0,80	23,31±1,21
БС	7,05±0,50	13,95±0,42*	14,58±1,05*
Ризогумін	6,96±0,31*	12,92±0,67*	15,79±0,84*

Примітки: * відмінності, порівнюючи з контролем, вірогідні при $P \leq 0,05$;

*¹ – температура повітря – 20°C, вологість = 60 %, сила вітру – 6,7 км/год;

*² – температура повітря – 25°C, вологість = 57 %, сила вітру – 5 км/год;

*³ – температура повітря – 21°C, вологість = 55 %, сила вітру – 12 км/год.

Одним із інформативних показників водного обміну культурних рослин є водоутримувальна здатність. Зазначений показник характеризує ступінь витривалості та реакцію рослин на зміни клімату [1]. Встановлено, що мікробні препарати впливали на водоутримувальну здатність листків нуту звичайного упродовж вегетаційного періоду (табл. 3). У фазі вегетації листки рослин контрольного та дослідних варіантів через 2 год практично втратили однакову кількість води. Спостерігалася тенденція до зменшення на 12,2 % водовтрати листками за впливу БС, порівнюючи з контролем. Аналогічну закономірність виявлено через 4 год. Кількість втраченої води листками рослин зазначеного вище варіанту була на 5,2 % меншою, порівнюючи з контролем. Через 24 год після випаровування листки нуту звичайного варіанту БС статистично вірогідно втратили на 9,7 % менше води, що вказує на вищу водоутримувальну здатність колоїдів цитоплазми мезофілу листків. За передпосівної обробки насіння Ризогуміном у фазі вегетації листки рослин характеризувалися вищим обводненням і це, очевидно, вплинуло на втрати ними води під час підсушування.

Вплив мікробних препаратів на водоутримувальну здатність (%) листків нуту звичайного сорту Скарб, $M \pm m$, $n=6$

Варіант	Фаза росту і розвитку рослин		
	вегетації* ¹	цвітіння, початок утворення бобів* ²	зелений біб* ³
Втрата води листками через 2 год			
Контроль	18,92±1,15	26,92±0,86	10,96±0,47
БС	16,61±1,44	23,95±1,77	10,02±0,53
Ризогумін	18,36±0,85	16,85±1,27*	10,37±0,82
Втрата води листками через 4 год			
Контроль	31,48±0,90	35,26±1,21	17,18±0,77
БС	29,84±1,92	28,45±1,39*	13,53±0,64*
Ризогумін	32,88±1,09	21,28±1,63*	12,51±0,52*
Втрата води листками через 24 год			
Контроль	46,71±1,21	73,36±1,64	55,79±1,22
БС	42,64±0,64*	57,83±1,51*	48,19±0,78*
Ризогумін	47,47±1,15	43,95±1,16*	46,51±1,45*

Примітки: *відмінності, порівнюючи з контролем, вірогідні при $P \leq 0,05$;

*¹ – температура повітря – 20°C, вологість = 60 %, сила вітру – 6,7 км/год;

*² – температура повітря – 25°C, вологість = 57 %, сила вітру – 5 км/год;

*³ – температура повітря – 21°C, вологість = 55 %, сила вітру – 12 км/год.

У фазі цвітіння, початок утворення бобів загальний уміст води у листках нуту звичайного був найвищий упродовж онтогенезу і відтак вони більше її втрачали. За впливу інокуляції листки рослин характеризувалися статистично вірогідно більшою водоутримувальною здатністю, відповідно через 2 год після підсушування вони втратили на 11,0 % (БС) та 37,4 % (Ризогумін), через 4 год – на 19,3 % (БС) та 39,7 % (Ризогумін), через 24 год – на 21,2 % (БС) та 41,5 % (Ризогумін) води менше.

У фазі зеленого бобу виявлено аналогічну закономірність стосовно показників водоутримувальної здатності листків нуту звичайного за впливу мікробних препаратів. Проте, через 2 год після випаровування води листками зазначені показники контрольного і дослідних варіантів суттєво не відрізнялися між собою. За більш тривалого зневоднення (через 4 та 24 год) листки дослідних рослин статистично вірогідно з більшою силою утримують воду й на 21,5 % та 13,6 % (БС) і 27,2 % та 16,6 % (Ризогумін) менше її втрачають, порівнюючи з контролем.

Отже, водний режим рослин тісно пов'язаний з їх стійкістю до посухи. Висока посухостійкість проявляється в здатності клітин та тканин витримувати й регулювати витрату води, при цьому запобігати виникненню водного дефіциту, і також здатністю з глибоких горизонтів ґрунту споживати воду [6].

Висновки

Нут звичайний завдяки високій харчовій та кормовій цінності, посухо- та жаростійкості є перспективною бобовою культурою в умовах зміни клімату для Західного Лісостепу України. Важливим елементом технології вирощування культури, який впливає на процеси водообміну рослин, є обробка насіння перед сівбою мікробними препаратами. Виявлено, що за їх впливу знижується водний дефіцит листків та підвищується їх водоутримувальна здатність упродовж онтогенезу нуту звичайного, а відтак стійкість до посухи.

Мікробні препарати, зокрема бактеріальну суспензію селекціонованого штаму *Mesorhizobium ciceri* ND-64 (БС) та Ризогумін, доцільно використовувати для передпосівної обробки насіння нуту звичайного як елемент агротехнології, для підвищення посухостійкості культури в умовах аридизації клімату.

1. Векірчик К. М. Фізіологія рослин. Практикум. Київ : Вища школа. Головне видавництво, 1984. 240 с.
2. Водотримуюча здатність листків нуту звичайного за впливу рекультиванту композиційного TREVITAN® / Шуль О. та ін. *Всеукраїнська науково-практична конференція Litteris et Artibus: Нові горизонти* : збірник матеріалів. Кременець : ВЦ КОГПА ім. Тараса Шевченка, 2024. Вип. ІХ. С. 297–300.
3. Воропай Ю. В., Чигрин О. В., Деревянко І. О. Вплив елементів технології вирощування на вміст хлорофілу в рослинах нуту. *Таврійський науковий вісник*. 2024. № 135. Ч. 1. С. 40–45. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.135.1.6>.
4. Каталог сортів та гібридів селекційно-генетичного інституту національного центру насіннєзнавства та сортовивчення. Одеса, 2023. 128 с.
5. Колодка А. В., Твердохліб О. В. Механізм посухостійкості у рослин. V Міжнародна конференція молодих учених: Харківський природничий форум. збірник тез, м. Харків, 19–20 травня 2022 р. Харків, 2022. С. 50–54.
6. Манько М. В., Олексійченко Н. О., Соваков О. В. Порівняльне оцінювання водотримуючої здатності листків рослин культиваторів *Acer platanoides* L. в умовах міста Києва. *Науковий вісник НЛТУ України. Лісове та садово-паркове господарство*. 2016. Вип. 26.3. С. 131–137. https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2016/26_3/23.pdf.
7. Паливода Ю. М., Гавій В. М. Фізіолого-біохімічні особливості формування адаптивної відповіді рослин в умовах водного дефіциту. *Наукові записки НДУ М. Гоголя. Біологічні науки*. 2023. № 1. С. 52–58. <https://doi.org/10.31654/2786-8478-2023-BN-1-52-58>.
8. Петриченко В. Ф., Лихочвор В. В. Рослиництво. Нові технології вирощування польових культур. 5-е вид., виправ., доповн. Львів : НВФ Українські технології, 2020. 806 с.
9. Ріст та розвиток нуту в умовах Північно-Східного Лісостепу України / Мельник А. В. та ін. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. 2020. Вип. 2 (40). С. 38–46.
10. Січкач В. І. Технологія для нуту. *The Ukrainian Farmer*. 2019. № 1 (109). С. 26.
11. Січкач В. І., Бушулян О. В. Перспективи селекції нуту в умовах північного Лісостепу України. *Вісник аграрної науки*. 2000. № 1. С. 38–40.
12. Angela L. Pattison, Mohammad Nazim Uddin, Richard M. Trethowan Use of in-situ field chambers to quantify the influence of heat stress in chickpea (*Cicer arietinum*). *Field Crops Research*. 2021. Vol. 270. 108215. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108215>.
13. Chapter 1 – Plant growth-promoting microbiomes: History and their role in agricultural crop improvement / Pandey V. V. et al. *Plant-microbe interaction - recent advances in molecular and biochemical approaches*. 2023. Vol. 1. P. 1–44. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91875-6.00012-8>.
14. Chapter 15 – Chickpea wild relatives: potential hidden source for the development of climate resilient chickpea varieties / Melike Bakir et al. *Wild Germplasm for Genetic Improvement in Crop Plants*. 2021. P. 269–297. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822137-2.00015-1>.
15. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Hans-Otto Pörtner et al. 2022. 3056 p. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
16. Drought stress tolerance in plants: interplay of molecular, biochemical and physiological responses in important development stages / Oguz M. et al. *Physiologia*. 2022, 2 (4), 180–197.
17. Econometric analysis of the impacts of climate change on agriculture and implications for adaptation / Challinor A. J. et al. *Nature Climate*. 2014. Change. 4 (4) P. 287–291. <https://www.nature.com/articles/nclimate2153>.
18. Effect of high temperature on the reproductive development of chickpea genotypes under controlled environments / Viola Devasirvatham et al. *Funct Plant Biol*. 2012. Vol. 39(12). P. 1009–1018. <https://doi.org/10.1071/FP12033>.
19. Genome-wide identification and expression pattern analysis of lipoxygenase genes of chickpea (*Cicer arietinum* L.) in response to accelerated aging / Rinku Malviya et al. *Gene*. 2023. Vol. 874. 147482. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2023.147482>.
20. Jaune Vaitkeviciute Econometric analysis of the impacts of climate change on agriculture and implications for adaptation. *Sciences du Vivant [q-bio]*. Université de Bourgogne Franche-Comté (COMUE). 2018. Français. <https://hal.inrae.fr/tel-02791559>.
21. Maxime Ollier, Pierre-Alain Jayet, Pierre Humblot An assessment of the distributional impacts of autonomous adaptation to climate change from European agriculture. *Ecological Economics*. 2024. Vol. 222. 108221. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108221>.

22. Mendelsohn R. Efficient adaptation to climate change(Article). *Climatic Change*. 2000.Vol. 45. Issue 3–4. P. 583–600. <https://doi.org/10.1023/a:1005507810350>.
23. The 2024 Europe report of the Lancet Countdown on health and climate change: unprecedented warming demands unprecedented action / Kim R. van Daalen PhD, Prof Cathryn Tonne ScD, Prof Jan C. Semenza PhD et al. *The Lancet Public Health*. 2024. Vol. 9. Issue 7. P. e495–e522. [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(24\)00055-0](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(24)00055-0).

References

1. Vekirchuk K. M. Fiziologhiia roslyn. Praktykum. K. : Vyshcha shkola. Holovne vydavnytstvo, 1984. 240 s. [in Ukrainian]
2. Vodoutrymuiucha zdatnist lystkiv nutu zvychnyoho za vplyvu rekultyvantu kompozytsiynoho TREVITAN® / Shul O. ta in. *Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsiia Litteris et Artibus: Novi horyzonty* : zbirnyk materialiv. Kremenets : VTs KOHPA im. Tarasa Shevchenka, 2024. Vyp. IKh. S. 297–300. [in Ukrainian]
3. Voropai Yu. V., Chyhryn O. V., Derevianko I. O. Vplyv elementiv tekhnolohii vyroshchuvannia na vmist khlorofilu v roslynakh nutu. *Tavriyskyi naukovyi visnyk*. 2024. No 135. Ch. 1. S. 40–45. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.135.1.6>. [in Ukrainian]
4. Kataloh sortiv ta hibrydiv selektsiyno-henetychnoho instytutu natsionalnogo tsentru nasinnieznavstva ta sortovyvchennia. Odesa, 2023. 128 s. [in Ukrainian]
5. Kolodka A. V., Tverdokhlib O. V. Mekhanizm posukhostiykosti u roslyn. V Mizhnarodna konferentsiia molodykh uchenykh: Kharkivskyi pryrodnychi forum. zbirnyk tez, m. Kharkiv, 19–20 travnia 2022 r. Kharkiv, 2022. S. 50–54. [in Ukrainian]
6. Manko M. V., Oleksiichenko N. O., Sovakov O. V. Porivnialne otsiniuvannia vodoutrymuiuchoi zdatnosti lystkiv roslyn kultyvatoriv *Acer platanoides* L. v umovakh mista Kyieva. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy. Lisove ta sadovo-parkove hospodarstvo*. 2016. Vyp. 26.3. S. 131–137. https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2016/26_3/23.pdf. [in Ukrainian]
7. Palyvoda Yu. M., Havii V. M. Fiziolooho-biokhimiichni osoblyvosti formuvannia adaptyvnoi vidpovidi roslyn v umovakh vodnoho defitsytu. *Naukovi zapysky NDU M. Hoholia. Biolohichni nauky*. 2023. No 1. S. 52–58. <https://doi.org/10.31654/2786-8478-2023-BN-1-52-58>. [in Ukrainian]
8. Petrychenko V. F., Lykhochvor V. V. Roslynnystvo. Novi tekhnolohii vyroshchuvannia polovykh kultur. 5-e vyd., vyprav., dopovn. Lviv : NVF Ukrainski tekhnolohii, 2020. 806 s. [in Ukrainian]
9. Rist ta rozvytok nutu v umovakh Pivnichno-Skhidnogo Lisostepu Ukrainy / Melnyk A. V. ta in. *Visnyk Sumskoho natsionalnogo ahrarnoho universytetu*. 2020. Vyp. 2 (40). S. 38–46. [in Ukrainian]
10. Sichkar V. I. Tekhnolohiia dlia nutu. *The Ukrainer Farmer*. 2019. No 1 (109). S. 26. [in Ukrainian]
11. Sichkar V. I., Bushulian O. V. Perspektyvy selektsii nutu v umovakh pivnichnogo Lisostepu Ukrainy. *Visnyk ahrarnoi nauky*. 2000. No 1. S. 38–40. [in Ukrainian]
12. Angela L. Pattison, Mohammad Nazim Uddin, Richard M. Trethowan Use of in-situ field chambers to quantify the influence of heat stress in chickpea (*Cicer arietinum*). *Field Crops Research*. 2021. Vol. 270. 108215. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108215>.
13. Chapter 1 – Plant growth-promoting microbiomes: History and their role in agricultural crop improvement / Pandey V. V. et al. *Plant-microbe interaction - recent advances in molecular and biochemical approaches*. 2023. Vol. 1. P. 1–44. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91875-6.00012-8>.
14. Chapter 15 – Chickpea wild relatives: potential hidden source for the development of climate resilient chickpea varieties / Melike Bakir et al. *Wild Germplasm for Genetic Improvement in Crop Plants*. 2021. P. 269–297. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822137-2.00015-1>.
15. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Hans-Otto Pörtner et al. 2022. 3056 p. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
16. Drought stress tolerance in plants: interplay of molecular, biochemical and physiological responses in important development stages / Oguz M. et al. *Physiologia*. 2022, 2 (4), 180–197.
17. Econometric analysis of the impacts of climate change on agriculture and implications for adaptation / Challinor A. J. et al. *Nature Climate Change*. 2014. Change. 4 (4) P. 287–291. <https://www.nature.com/articles/nclimate2153>.
18. Effect of high temperature on the reproductive development of chickpea genotypes under controlled environments / Viola Devasirvatham et al. *Funct Plant Biol*. 2012. Vol. 39(12). P. 1009–1018. <https://doi.org/10.1071/FP12033>.

19. Genome-wide identification and expression pattern analysis of lipoxygenase genes of chickpea (*Cicer arietinum* L.) in response to accelerated aging / Rinku Malviya et al. *Gene*. 2023. Vol. 874. 147482. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2023.147482>.
20. Jaune Vaitkeviciute Econometric analysis of the impacts of climate change on agriculture and implications for adaptation. *Sciences du Vivant [q-bio]*. Université de Bourgogne Franche-Comté (COMUE). 2018. Français. <https://hal.inrae.fr/tel-02791559>.
21. Maxime Ollier, Pierre-Alain Jayet, Pierre Humblot An assessment of the distributional impacts of autonomous adaptation to climate change from European agriculture. *Ecological Economics*. 2024. Vol. 222. 108221. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108221>.
22. Mendelsohn R. Efficient adaptation to climate change(Article). *Climatic Change*. 2000.Vol. 45. Issue 3–4. P. 583–600. <https://doi.org/10.1023/a:1005507810350>.
23. The 2024 Europe report of the Lancet Countdown on health and climate change: unprecedented warming demands unprecedented action / Kim R. van Daalen PhD, Prof Cathryn Tonne ScD, Prof Jan C. Semenza PhD et al. *The Lancet Public Health*. 2024. Vol. 9. Issue 7. P. e495–e522. [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(24\)00055-0](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(24)00055-0).

I. V. Chernik

Volodymyr Hnatiuk Ternopil National Pedagogical University, Ukraine

PARAMETERS OF WATER EXCHANGE IN LEAVES OF CHICKPEA (*CICER ARIETINUM* L.) UNDER THE INFLUENCE OF MICROBIAL PREPARATIONS

The article presents the results of a study on the influence of pre-sowing seed treatment with a bacterial suspension of the selected strain *Mesorhizobium ciceri* ND-64 (BS) and the complex microbial preparation Rhizohumin on the water exchange parameters of common chickpea (*Cicer arietinum* L.) leaves of the Skarb variety, cultivated under the soil and climatic conditions of the Western Forest-Steppe of Ukraine (Ternopil region).

The study revealed that microbial preparations and climatic factors influence the water regime parameters of chickpea plants. During the flowering phase and the onset of bean formation, leaf tissues in all experimental variants exhibited the highest water content throughout the study period. A statistically significant increase in total leaf water content was observed following inoculation with BS during the vegetative phase and with Rhizohumin during flowering and the onset of bean formation.

Throughout ontogenesis, pre-sowing seed treatment with microbial preparations reduced water deficit and enhanced the water-holding capacity of chickpea leaf tissues. During the flowering, early bean formation, and green bean phases, a statistically significant reduction in leaf water deficit was observed, with decreases of 19.0 % and 37.5 % (BS) and 25.0 % and 32.3 % (Rhizohumin), along with an increase in water-holding capacity.

Two hours after dehydration, *Cicer arietinum* leaves treated with BS and Rhizohumin lost 11.0 % and 37.4 % less water, respectively. After 4 hours, water loss was 19.3 % (BS) and 39.7 % (Rhizohumin) lower, while after 24 hours, it was 21.2 % (BS) and 41.5 % (Rhizohumin) lower compared to the control. During the green bean phase, under extended dehydration conditions (4 and 24 hours), leaves of treated plants retained water more effectively, losing 21.5 % and 13.6 % (BS) and 27.2 % and 16.6 % (Rhizohumin) less water than the control.

A reduction in leaf water deficit and an increase in water-holding capacity indicate enhanced drought resistance in *Cicer arietinum* (Skarb variety) following treatment with a bacterial suspension of *Mesorhizobium ciceri* ND-64 and the complex microbial preparation Rhizohumin.

Key words: *Cicer arietinum* L., inoculation, water deficit, water-holding capacity, microbial preparations.

Надійшла 2.12.2024.

ОГЛЯДИ

УДК 58:069.029

doi: 10.25128/2078-2357.24.3–4.9

С. В. ПИДА, Н. М. ДРОБИК, Р. Л. ЯВОРІВСЬКИЙ, Н. В. ГЕРЦ, Л. С. БАРНА,
О. Б. МАЦЮК, П. В. ХУДИК, О. Я. БУЧКОВСЬКА

Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка
вул. М. Кривоноса, 2, Тернопіль, 46027
e-mail: spyda@ukr.net

БІБЛІЙНИЙ БОТАНІЧНИЙ САД ТЕРНОПІЛЬСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО ПЕДАГОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ГНАТЮКА : ЗАПОЧАТКУВАННЯ ТА РОЗВИТОК

У статті узагальнено результати дослідження історії зачаткування Біблійного ботанічного саду в Тернопільському національному педагогічному університеті імені Володимира Гнатюка (ТНПУ) та поповнення його видового складу. Показано, що Гефсиманський сад в Ізраїлі є першим біблійним садом, що закладений у глибоку давнину, і на сьогодні є одним із 9 найбільш відомих біблійних ботанічних садів світу. Перший біблійний сад в Україні та один із найбільших у Європі був відкритий 4 квітня 2011 року в містечку Пречистої Діви Марії – Маріямполі на Івано-Франківщині. Учені Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича Світлана Руденко, Оксана Івасюк, Степан Костишин, протоієрей Микола Щербань першими в Україні висунули ідею створення біблійних ботанічних садів при закладах вищої освіти та детально описали її у монографії «Рослини Святого Письма та перспективи створення біблійного саду». Професор кафедри ботаніки та зоології Микола Барна зініціював й обґрунтував у монографії перспективи створення Біблійного ботанічного саду у ТНПУ. План-проект Біблійного ботанічного саду ТНПУ розробили Заслужений архітектор України, викладач кафедри образотворчого мистецтва, дизайну та методики її навчання ТНПУ Михайло Нетриб'як та дизайнер Михайло Твердий.

Закладання Біблійного ботанічного саду у ТНПУ відбулося 15 квітня 2019 року в рамках святкування Дня університету, приуроченого 79-ій річниці від дня його заснування. Започаткування Біблійного ботанічного саду було відзначено відкриттям мармурової фігури розгорнутої книги Біблії і висаджуванням дерев і кущів, які згадують на сторінках Святого Письма. Упродовж 2020–2024 рр. на території Біблійного ботанічного саду було встановлено скульптурні композиції «Богородиця», «Вознесіння Господнє» та мистецьку інсталяцію у вигляді розп'яття Хреста «Голгофа».

На території Біблійного ботанічного саду ТНПУ зростає 44 види рослин, з них 17 видів згадано на сторінках Святого Письма. 4 види належать до відділу Голонасінні (*Pinophyta*), 13 – Покритонасінні (*Magnoliophyta*). У перспективі заплановано розширення видового складу рослин, про які згадано у Святому Письмі, видів, занесених до Червоної книги, красиво квітучих та декоративно-листяних дерев, кущів і ліан.

Ключові слова: біблійний ботанічний сад, Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка, Святе Письмо, історія створення, біблійні рослини.

Рослини виконують важливу роль у житті людини. Вони не лише забезпечують її продуктами харчування й слугують джерелом ліків, але є важливими символами духовних істин, ознаками багатьох предметів, понять та явищ і моральних цінностей. Саме тому рослинний світ займає важливе місце в біблійних текстах. Різноманітність рослин, згаданих у Біблії, відображає природні умови стародавнього Близького Сходу та водночас несе глибоке символічне значення. Виноградна лоза, оливкове дерево, фігове дерево, кедри та мирра – це лише деякі з рослин, які згадано в Писанні та які виконували важливу роль у повсякденному житті людей того часу.

Рослини в Біблії часто символізують духовні цінності: праведність, процвітання, покаяння та Божу милість. Через метафори й притчі вони допомагають розкрити важливі аспекти взаємин між Богом і людиною, а також показати зв'язок між духовним світом і природою. Крім символічного значення, рослини використовували в релігійних обрядах, у побуті, що ще більше підкреслює їхню вагомість у біблійних оповідях [7, 12].

Сфера виховання моральних та етичних цінностей молоді в державі, на території якої відбуваються військові дії, і, відповідно, є гостра необхідність у захисті її суверенітету та незалежності, також зважаючи на євроінтеграційні прагнення України, є наразі дуже актуальною [3, 8]. Створення Біблійного ботанічного саду на базі дендрарію Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка (ТНПУ) є одним із перших подібних проєктів у закладах вищої освіти України, який сприятиме вирішенню цієї проблеми.

Історія створення Біблійних садів має вікові корені, що сягають давнини, від першого біблійного саду – Гефсиманського саду в Ізраїлі, який на сьогодні є одним з 9-ти найбільш відомих біблійних ботанічних садів світу [1]. В Україні ініціатива створення біблійних ботанічних садів до 2011 року не реалізовувалася. Перший біблійний сад в Україні та один із найбільших у Європі був відкритий 4 квітня 2011 року в містечку Пречистої Діви Марії – Маріямполі на Івано-Франківщині. Автором ідеї та головним організатором робіт став голова громадської організації «Комітет з відродження Маріямполь» професор Івано-Франківського національного медичного університету Володимир Боцюрко [11].

Щодо проєкту створення біблійних ботанічних садів у закладах вищої освіти, першими в Україні стали вчені Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, які висунули таку ідею та детально описали її у монографії «Рослини Святого Письма та перспективи створення біблійного саду» Світлана Руденко, Оксана Івасюк, Степан Костишин, протоієрей Микола Щербань [13]. Автори показали, що дослідження біблійних рослин має багатогранне значення, і виділили найголовніші аспекти, зокрема:

– «...зміст багатьох біблійних притч ґрунтується на прикладах рослин та змін, які з ними відбуваються. На особливу увагу теологів заслуговують також рослини Святого Письма, які у біблійні часи використовувались у церковних обрядах: для священного помазання, кадіння, для світильників, жертвоприношення, виготовлення культових предметів, у культових ритуалах, їхні зображення прикрашали інтер'єри та службові шати священників;

–...рослини Святого Письма – безцінне джерело інформації для такого напрямку біблієзнавства як біблійна етнологія...;

– біблійні рослини, репрезентативні види яких дожили до наших днів, наповнюють вивчення Святого Письма аспектом реалістичності. Вони допомагають нам усвідомити зв'язок античної доби із сучасністю, тобто біблійні рослини забезпечують раціонально-схоластичний рівень пізнання Святого Письма;

–... Біблія містить багато цікавих відомостей для спеціалістів-біологів. Ботаніків вона збагачує безцінною інформацією про рослинний світ, поширений тисячоліття тому на берегах Середземного та Червоного морів. Генетикам та селекціонерам рослини Святого Письма дають можливість уточнити відомості про центри походження культурних рослин, що, як відомо, збігаються з давніми цивілізаціями і слугують осередками найбагатшого генофонду цих рослин...» [13].

Взявши за основу вищезазначену монографію, врахувавши наявність в структурі ТНПУ дендрарію, на території якого знаходиться церква святої Софії Премудрості Божої та зростають

види рослин, частина з яких згадується у Святому Письмі, зокрема, горіх грецький (*Juglans regia* L.), верба біла (*Salix alba* L.), клен несправжньооплатановий або явір (*Acer pseudoplatanus* L.), професор кафедри ботаніки та зоології Микола Миколайович Барна ініціював і обґрунтував у монографії перспективи створення Біблійного ботанічного саду у ТНПУ [1, 2]. Ідея знайшла велику підтримку в особі викладачів кафедри ботаніки та зоології, колективу хіміко-біологічного факультету та ректорату університету. Для реалізації цієї ідеї професор Микола Барна і завідувачка кафедри ботаніки та зоології професор Світлана Піда взяли участь у конкурсі проєктів національної співпраці у рамках Програми *Culture Bridges*, спрямованої на підтримку розвитку культурного сектору України, що була здійснена Британською Радою у партнерстві з Мережею національних інститутів культури Європейського Союзу (EUNIC) в Україні (діяла з листопада 2017 року до жовтня 2020 року). Метою конкурсної пропозиції було зміцнення навчально-матеріальної та наукової бази університету, створення рекреаційної зони для студентів, учнів і жителів мікрорайону Дружба, покращення туристичної привабливості міста Тернополя, створення осередку вивчення Біблії під відкритим небом, популяризації Святого Письма серед усіх верств населення, активізації виховання дітей та молоді на християнських засадах, поліпшення екології навколишнього середовища та збільшення видового складу флори міста Тернополя.

План-проєкт Біблійного ботанічного саду ТНПУ розробили Заслужений архітектор України, викладач кафедри образотворчого мистецтва, дизайну та методики її навчання ТНПУ Михайло Миколайович Нетриб'як та дизайнер Михайло Романович Твердий (рис. 1) [11].



Рис. 1. План-схема території Біблійного ботанічного саду ТНПУ.

15 квітня 2019 року відбулося закладання Біблійного ботанічного саду в рамках святкування Дня університету, приуроченого до 79-ї річниці від дня його заснування. Цей захід за участі священників обласної Ради Церков, представників міської та обласної влади, народних депутатів, засобів масової інформації, викладачів та студентів університету став важливою подією в історії закладу. Дата 15 квітня була обрана не випадково, оскільки вона має символічне значення. Варто зазначити, що саме 15 квітня 1940 року постановою Ради Народних Комісарів на базі Кременецького ліцею був відкритий вчительський інститут, у якому вперше заняття розпочали українською мовою. У 1969 році педагогічний інститут перебазували до Тернополя. Освіта і духовність – це два крила, які допомагають державі розвиватися.

Метою роботи було дослідити історію створення Біблійного ботанічного саду ТНПУ та поповнення його видового складу.

Започаткування Біблійного ботанічного саду було відзначено відкриттям мармурової фігури розгорнутої книги Біблії (рис. 2) (автори скульптури Заслужений архітектор України М. М. Нетриб'як та народний художник України Р. К. Вільгушинський), яка віднесена до ТОП-18 релігійних пам'яток м. Тернопіль. У пам'ятник Біблії було вкладено капсулу з посланням для майбутніх поколінь, що містить важливі свідчення про цей історичний момент, прагнення зберегти духовну та культурну спадщину для майбутніх поколінь та об'єднання людей навколо ідеї збереження природи й духовності. Капсула часу символізує зв'язок між поколіннями, нагадуючи про важливість цього проекту для розвитку не лише ботанічної науки, але й духовного збагачення суспільства. Відтак була проведена акція висаджування дерев і кущів. Під час закладання Біблійного ботанічного саду було висаджено 11 дерев і кущів п'яти видів, які згадано на сторінках Святого Письма: бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.) – 1; дуб звичайний (*Quercus robur* L.) – 4; тамарикс манноносний (*Tamarix tetrandra* Pall. ex Vieb.) – 2; ялівець звичайний (*Juniperus communis* L.) – 2; ялівець козацький (*Juniperus sabina* L.) – 2 (рис. 3) та 7 саджанців самшиту вічнозеленого (*Buxus sempervirens* L.) [3]. Один із саджанців *Quercus robur* був вирощений із жолудів дуба, що ріс на батьківщині Тараса Шевченка в селі Моринці за життя поета і зберігся там до цього часу [11]. Посадковий матеріал, а саме саджанці самшиту вічнозеленого та 2 саджанці ялівцю звичайного були любязно надані тодішнім ДП «Бережанське лісомисливське господарство».

22 жовтня 2020 року в рамках VII Конгресу молодих дослідників релігії «Релігія в сучасній культурі» у Біблійному саду на території Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка відбулося урочисте відкриття скульптурної композиції «Вознесіння Господнє» (рис. 4). Автори композиції – викладачі кафедри образотворчого мистецтва, дизайну та методики їх навчання факультету мистецтв ТНПУ заслужений архітектор України М. М. Нетриб'як і народний художник України Р. К. Вільгушинський. Відкриття мистецької композиції проходило за участі Ради Церков, релігійних організацій Тернопільської області, магістрантів історичного факультету спеціальності «Релігієзнавство».



Рис. 2. Фігура розгорнутої книги Біблії Біблійного саду ТНПУ.



Рис. 3. Ялівець козацький (*Juniperus sabina* L.) Біблійного саду ТНПУ.

«Культура, духовність, мистецтво – це ті речі, які формують свідому особистість і доброго християнина. Дуже символічно, що така скульптура з'являється поруч з педагогічним університетом, де виховуються майбутні педагоги та вчителі і згодом вони передаватимуть свою духовність, культуру, знання дітям, – наголосив міський голова Сергій Надал. Розвиток

традиційних християнських, духовних і сімейних цінностей – це те, чого у сучасному світі надзвичайно бракує, тому ми спільно повинні працювати над їхнім відродженням». Очільник міста висловив вдячність колективу університету за чергову ініціативу та за усі ті добрі справи, які робляться не лише на благо університету, а й заради розвитку міста.

Восени 2021 року у Біблійному саду ТНПУ було встановлено і навесні 2022 року до Дня університету освячено скульптурну композицію «Богородиця» (рис. 5), авторами якої були Заслужений архітектор України Михайло Миколайович Нетриб'як та народний художник України Роман Казимирович Вільгушинський.



Рис. 4. Фігура Ісуса Христа
«Вознесіння Господнє» Біблійного
саду ТНПУ.



Рис. 5. Фігура Матері Божої
«Богородиця» Біблійного саду
ТНПУ.

Викладачі та студенти хіміко-біологічного факультету кожного року висаджують види рослин, які згадано на сторінках Святого Письма, зокрема було висаджено по 2–3 екземпляри бука лісового (*Fagus sylvatica* L.), граба звичайного (*Carpinus betulus* L.), ясена звичайного (*Fraxinus excelsior* L.), тамариксу чотиритичинкового (*Tamarix tetrandra* Pall. ex Vieb.) та тамараксу манноносного або «манни небесної» (*Tamarix mannifera* Ehrbg. Flagey), тису ягідного або негний-дерева (*Taxus baccata* L.). Варто зазначити, що частину посадкового матеріалу надали працівники філії «Петриківське лісове господарство» державного спеціалізованого господарського підприємства «Ліси України». Незважаючи на те, що Україна знаходиться в умовах воєнного стану, на сьогодні Біблійний ботанічний сад продовжує свій розвиток, а його видовий склад постійно поповнюють та розширюють. У 2022–2023 роках на території Біблійного саду університету за участі колективу хіміко-біологічного факультету було висаджено тую західну (*Thuja occidentalis* L.) (рис. 6), кущі самшиту вічнозеленого (*Buxus sempervirens* L.), форзиції європейської (*Forsythia europaea* Degen et Bald.), жасмину кущового (*Jasminum fruticans* L.), гібіскусу китайського (*Hibiscus rosa-sinensis* L.), лаванди вузьколистої (*Lavandula angustifolia* Mill.) (рис. 7), 94 цибулини тюльпанів (*Tulipa* L.), понад 100 цибулин нарцисів (*Narcissus* L.), 20 кореневищ ірисів (*Iris* L.), хости (*Hosta* Tratt.), айстри (*Aster* L.), хризантеми (*Chrysanthemum* L.), чорнобривці (*Tagetes* L.) та ін. [11].

15 квітня 2022 року під час святкування 82 річниці народження ТНПУ в рамках «Української академії лідерства», що проходила на базі університету, молодь з Маріуполя, Києва, Харкова висадили тую західну (*Thuja occidentalis* L.) (рис. 6) та тис ягідний (*Taxus baccata* L.).

ОГЛЯДИ

Упродовж 2021–2023 років за сприяння почесного консула Угорщини в Тернополі та в Тернопільській області, президента благодійного фонду «Подільяни» Тетяни Чубак у рамках акції «Мільйон дерев пам'яті та життя», яка спрямована на підтримання благодійної ініціативи «1000 дронів для України», було висаджено дерева гінґо дволопатевого (*Ginkgo biloba* L.), софори японської (*Sophora japonica* L.), вишні японської або сакури (*Prunus serrulata*) (рис. 8), яблуні райської (*Malus pumila*), яка символізує початок світу, кущі бузку звичайного (*Syringa vulgaris* L.), барбарису звичайного (*Berberis vulgaris* L.), калини звичайної (*Viburnum opulus* L.), гортензії волотистої (*Hydrangea paniculata*), троянди (*Rosa* L.) та ялівцю козацького (*Juniperus sabina* L.) [11].



Рис. 6. Туя західна (*Thuja occidentalis* L.).



Рис. 7. Лаванда вузьколиста (*Lavandula angustifolia* Mill.).



Рис. 8. Вишня японська або сакура (*Prunus serrulata*).

З ініціативи Архімандрита Лаврентія (у миру – Віктор Володимирович Живчик, випускник хіміко-біологічного факультету ТНПУ), священнослужителя Свято-Михайлівського Золотоверхого собору в 2023 році було висаджено рослини, що згадані у Святому Письмі,

зокрема сосну алепську (*Pinus halepensis* Mill.) (рис. 9), кущі троянди дамаської (*Rosa damascena* Mill.), вербу козячу (*Salix caprea* L.), плакучу форму (рис. 10) [11].



Рис. 9. Сосна алепська
(*Pinus halepensis* Mill.).



Рис. 10. Верба козяча
(*Salix caprea* L.), плакуча форма.

У Біблійному ботанічному саду ТНПУ біля кожної висадженої рослини є етикетка (рис. 11), на якій зазначено українську та латинську видові назви, назву рослини у Біблії та її біблійне значення [11].



Рис. 11. Зовнішній вигляд табличок, що розміщені біля рослин Біблійного саду.

21 квітня 2024 року під час святкування Фестивалю професій «Гостини в ТНПУ» у Біблійному саду ТНПУ відкрито нову мистецьку інсталяцію у вигляді розп'яття Хреста і освячений алегоричний збірний образ «Голгофа» (рис. 12). Інсталяцію виготовили викладачі та студенти факультету мистецтв. Чин освячення «Голгофи» здійснив капелан ТНПУ отець Віталій Козак і у своїй проповіді розкрив тризначний символізм проєкту за християнським вченням.

Віталій Козак пояснив, що «Хрест – це дерево Господнє, дерево, яке символізує життя. Христос перетворив Хрест у зброю, зробивши його знаряддям перемоги, це – символ подолання смерті, він надихає нас до перемоги». Священник зазначив також, що «Хрест – це

страждання, яке проходив Христос на своїй дорозі, воно не вічне. Це ще одна наука, адже ці випробування, які випали на долю українського народу, матимуть кінець. Страждання – нас гартують і скріплюють. Це – приклад Христа».

Відповідно до проповіді університетського капелана, третє значення Хреста «це – властивість стати людиною через дотик до терпіння. Емпатія, бажання допомогти, розділити біль – прагнення, що апелюють до найшляхетніших глибин людської душі». Отець Віталій зазначив, що «кожен через Хрест має можливість стати людиною, з побажаннями натхнення на подальші звершення, подолання труднощів і нашу остаточну перемогу».



Рис. 12. Інсталяція розп'яття Хреста – «Голгофа».

З нагоди святкування «Гостин в ТНПУ» у Біблійному саду ТНПУ працівниками кожного підрозділу університету (ректорат, науковий і навчальний відділи, 10 факультетів, бухгалтерія, господарська частина) було висаджено 15 саджанців вишні японської або сакури (*Prunus serrulata* Lindl.). Викладачі кафедри хімії і методики її навчання хіміко-біологічного факультету висадили 4 екземпляри катальпи бігнієподібної (*Catalpa bignonioides* Walt), яку інтродуковано у Кременецькому ботанічному саду. Працівники кафедри геоекології та гідрології географічного факультету висадили мигдаль звичайний (*Amygdalus communis* L.), інжир (фігове дерево) (*Ficus carica* L.), маклюру помаранчеву (*Maclura pomifera* (Raf.) Schneid) та бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.), які люб'язно надала директорка Кременецького ботанічного саду А. М. Ліснічук.

У травні 2024 року членами Національної скаутської організації України «Пласт» було висаджено саджанці дуба звичайного (*Quercus robur* L.), вирощених із жолудів, які привезли волонтери з Луганщини.

Більше п'яти років тому було розроблено проєкт Біблійного саду ТНПУ і, відповідно до його плану, кожного року розширюється видовий склад саду шляхом висадження біблійних та квітничково-декоративних рослин, встановлюють тематичні скульптури, до створення яких залучаються викладачі та студенти факультету мистецтв. У майбутньому заплановано створити нову інсталяцію на різдвяну тематику.

На території Біблійного ботанічного саду ТНПУ загалом зростає 44 види деревних, кущових та трав'яних рослин, із них 17 згадуються у Святому письмі. Життєві форми рослин встановлювали у відповідності з класифікацією І. Г. Серебрякова (1966) та Х. Раункієра [19]. Колекція видів, що зростають на території Біблійного ботанічного саду ТНПУ структурована за таксономічною системою APG IV [16]. Назви таксонів українською мовою наведено у

ОГЛЯДИ

відповідності з словником [14]. Види, що належать до природної флори України, наведено згідно з С. Л. Мосякіним, М. М. Федорончуком [17].

Аналізуючи видовий склад Біблійного ботанічного саду, виявлено, що представники відділу Покритонасінні (*Magnoliophyta*) переважають – 38 (86,4 %), а частка Голонасінних (*Pinophyta*) менша – 6 видів (13,6 %). Значна кількість видів висаджена на території саду для задоволення естетичних потреб згідно з проектом ландшафтного дизайну (таблиця).

Серед видів Біблійного ботанічного саду ТНПУ трапляються представники 28 родин. За чисельністю домінують види родин Айстрові або Складноцвіті (*Asteraceae*), Розові (*Rosaceae*), Лілійні (*Liliaceae*), Маслинові (*Oleaceae*) – по 4 види (по 9,10 % від загальної чисельності), Кипарисові (*Cupressaceae*) – 3 види (6,83 %), Букові (*Fagaceae*) та Шовковицеві (*Moraceae*) – по 2 види (по 4,54 %). 21 родина є монотипною, тобто презентована у загальній систематичній структурі лише 1 видом. Серед них Вербові (*Salicaceae*), Горіхові (*Juglandaceae*), Ліщинові (*Corylaceae*), Бігніонієві (*Bignoniaceae*), Кленові (*Aceraceae*), Бобові (*Fabaceae*), Липові (*Tiliaceae*), Барбарисові (*Berberidaceae*), Жимолостеві (*Caprifoliaceae*), Тамариксові (*Tamaricaceae*), Мальвові (*Malvaceae*), Гортензієві (*Hydrangeaceae*), Барвінкові (*Apocynaceae*), Губоцвіті (*Lamiaceae*), Самшитові (*Buxaceae*), Півонієві (*Paeoniaceae*), Амарилисові (*Amaryllidaceae*), Півникові (*Iridaceae*), Соснові (*Pinaceae*), Тисові (*Taxaceae*) та Гінкгові (*Ginkgoaceae*) [10].

Таблиця

Перелік видів рослин Біблійного ботанічного саду Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка [5, 18]

Українська видова назва	Латинська видова назва	Родина	Біблійна назва
Відділ Покритонасінні – <i>Magnoliophyta</i>			
Айстра багаторічна	<i>Aster perennis</i> L.	Айстрові – <i>Asteraceae</i>	—
Ромашка продірявлена (непахуча)	<i>Matricaria perforata</i> Merat		—
Чорнобривці розлогі	<i>Tagetes patula</i> L.		—
Хризантема увінчана	<i>Chrysanthemum coronarium</i> L.		—
Вишня японська (сакура)	<i>Prunus serrulata</i>	Розові – <i>Rosaceae</i>	—
Мигдаль звичайний	<i>Amygdalus communis</i> L.		мигдальне дерево
Троянда дамаська	<i>Rosa damascena</i> Mill.		троянда Шарону
Яблуня домашня	<i>Malus domestica</i> Borkh.		—
Лілія біла	<i>Lilium candidum</i> L.	Лілійні – <i>Liliaceae</i>	лілія
Лілійник рудуватий	<i>Hemerocallis fulva</i> (L.) L.		—
Тюльпан гібридний	<i>Tulipa hybrida</i> L.		—
Госта здута	<i>Hosta ventricosa</i> Stearn		—
Бузок звичайний	<i>Syringa vulgaris</i> L.	Маслинові – <i>Oleaceae</i>	—
Ясен звичайний	<i>Fraxinus excelsior</i> L.		ясен
Форзиція європейська	<i>Forsythia europaea</i> Degen et Bald		—
Жасмин кущовий	<i>Jasminum fruticans</i> L.		—
Бук лісовий	<i>Fagus sylvatica</i> L.	Букові – <i>Fagaceae</i>	бук
Дуб звичайний	<i>Quercus robur</i> L.		сикомора, фігове дерево-дуб
Інжир	<i>Ficus carica</i> L.	Шовковицеві – <i>Moraceae</i>	фігове дерево
Маклюра помаранчева	<i>Maclura pomifera</i> (Raf.) Schneid		–
Верба козяча	<i>Salix caprea</i> L.	Вербові – <i>Salicaceae</i>	верба
Горіх грецький (волоський)	<i>Juglans regia</i> L.	Горіхові – <i>Juglandaceae</i>	горіхове дерево
Граб звичайний	<i>Carpinus betulus</i> L.	Ліщинові – <i>Corylaceae</i>	граб
Катальпа бігніонієподібна	<i>Catalpa bignonioides</i> Walt.	Бігніонієві – <i>Bignoniaceae</i>	—
Клен	<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	Кленові –	клен, явір

ОГЛЯДИ

несправжньо-платановий (явір)		<i>Aceraceae</i>	
<i>Продовження таблиці</i>			
Софора японська (японська акація)	<i>Styphnolobium japonicum</i> (L.) Schott	Бобові – <i>Fabaceae</i>	—
Липа серцелиста	<i>Tilia cordata</i> Mill.	Липові – <i>Tiliaceae</i>	—
Барбарис звичайний	<i>Berberis vulgaris</i> L.	Барбарисові – <i>Berberidaceae</i>	—
Калина звичайна	<i>Viburnum opulus</i> L.	Жимолостеві – <i>Caprifoliaceae</i>	—
Тамарикс чотиритичинковий	<i>Tamarix tetrandra</i> Pall. ex Bieb.	Тамарикові – <i>Tamaricaceae</i>	манна небесна
Гібіск китайський (китайська роза)	<i>Hibiscus rosa-sinensis</i> L.	Мальвові – <i>Malvaceae</i>	—
Гортензія волотиста	<i>Hydrangea paniculata</i> L.	Гортензієві – <i>Hydrangeaceae</i>	—
Барвінок малий	<i>Vinca minor</i> L.	Барвінкові – <i>Aporosynaceae</i>	—
Лаванда вузьколиста	<i>Lavandula angustifolia</i> Mill.	Губоцвіті – <i>Lamiaceae</i>	—
Самшит вічнозелений	<i>Buxus sempervirens</i> L.	Самшитові – <i>Buxaceae</i>	—
Півонія вузьколиста (піон)	<i>Paeonia tenuifolia</i> L.	Півонієві – <i>Paeoniaceae</i>	—
Нарцис вузьколистий	<i>Narcissus angustifolius</i> Curt.	Амарилісові – <i>Amaryllidaceae</i>	—
Півники флорентійські	<i>Iris florentina</i> L.	Півникові – <i>Iridaceae</i>	ірис, лілія
Відділ Голонасінні – <i>Pinophyta</i>			
Ялівець звичайний	<i>Juniperus communis</i> L.	Кипарисові – <i>Cupressaceae</i>	яловець
Ялівець козацький	<i>Juniperus sabina</i> L.		яловець
Туя західна	<i>Thuja occidentalis</i> L.		—
Сосна алепська	<i>Pinus halepensis</i> Mill.	Соснові – <i>Pinaceae</i>	сосна
Тис ягідний	<i>Taxus baccata</i> L.	Тисові – <i>Taxaceae</i>	негний-дерево
Гінкго дволопатеве	<i>Ginkgo biloba</i> L.	Гінкгові – <i>Ginkgoaceae</i>	—

Із 44 видів, які зростають на території Біблійного ботанічного саду ТНПУ, 17 згадано на сторінках Святого Письма. Ці види належать до 2 відділів: Голонасінні (*Pinophyta*) – 4 види (23,5 %) та Покритонасінні або Квіткові (*Magnoliophyta*) – 13 видів (76,5 %); 3 класів: Хвойні (*Pinopsida*) – 4 види (23,5 %), Однодольні (*Liliopsida*) – 2 види (11,8 %) та Дводольні (*Magnoliopsida*) – 11 видів (64,7 %); 14 родин: Кипарисові (*Cupressaceae*), Букові (*Fagaceae*), Розові (*Rosaceae*) – по 2 види, а також монотипні родини Тисові (*Taxaceae*), Соснові (*Pinaceae*), Лілійні (*Liliaceae*), Півникові (*Iridaceae*), Вербові (*Salicaceae*), Горіхові (*Juglandaceae*), Ліщинові (*Corylaceae*), Кленові (*Aceraceae*), Тамарикові (*Tamaricaceae*), Шовковицеві (*Moraceae*) та Маслинові (*Oleaceae*).

Заплановано що в подальшому у Біблійному ботанічному саду будуть культивуватися такі види дерев, кущів і ліан: каштан їстівний (*Castanea sativa* Mill.), виноград справжній (*Vitis vinifera* L.), дуб кам'яний (*Quercus ilex* L.), яблуня ягідна (*Malus baccata* (L.) Borkh.), шовковиця чорна (*Morus nigra* L.), мирт звичайний (*Myrtus communis* L.), платан східний (*Platanus orientalis* L.), тополя біла (*Populus alba* L.), слива колюча або терен (*Prunus spinosa* L.), а також види трав'янистих рослин: лепеха звичайна або айр тростинний (*Acorus calamus* L.), кукуль звичайний (*Agrostemma githago* L.), алое деревоподібне (*Aloe arborescens* Mill.), полин гіркий (*Artemisia*

absinthium L.), дзвоники середні (*Campanula medium* L.), будяк кучерявий (*Carduus crispus* L.), осоти польовий (*Cirsium arvense* (L.) Scop.), городній (*C. oleraceum* (L.) Scop.) та звичайний (*C. vulgare* (Savi) Ten.), ясенець голоствовпчиків (*Dictamnus gymnostylis* Stev.), боби (*Faba bona* Medik.), м'ята колосоподібна (*Mentha spicata* L.), очерет звичайний або південний (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), гірчиця розсічена (*Sinapis dissecta* Lag.), кропива жалка (*Urtica urens* L.), горошок посівний (*Vicia sativa* L.) та ін. [2, 3].

Окрім біблійних рослин, на території саду передбачено висаджування видів, занесених до «Червоної книги України. Рослинний світ (2009)» [4, 6, 9, 15], красиво квітучих та декоративно-листяних дерев, кущів, ліан, зокрема берези Клокова (*Betula klokovii* Zaverucha), береки (*Sorbus torminalis* (L.) Grantz.), тюльпанового дерева (*Liriodendron tulipifera* L.), магнолії японської (*Magnolia kobus* DC.), катальпи північної (*C. speciosa* (Warder) Warder ex Engelm.), багрянника японського (*Cercidiphyllum japonicum* Sieb. et Zucc), скумпії звичайної або рай-дерев (*Cotinus coggygria* Scop.), сумаху коротковолосяного або оцтового дерева (*Rhus typhina* L.), барбарису Тунберга (*Berberis thunbergii* DC.), хеномелес японської (*Chaenomeles speciosa* (Sweet) Nakai), таволги середньої (*Spiraea media* Franz Schmidt), актинїдії гострої (*Actinidia arguta* (Sieb. et Zucc.) Planch. ex Miq.), плюща звичайного (*Hedera helix* L.) [26].

Розширення Біблійного ботанічного саду в умовах Тернопільської області передбачає ретельний підхід до підбору рослин з урахуванням місцевого клімату. Деякі біблійні рослини, зокрема оливкове дерево, кедр ліванський або мирт, через обмежену морозостійкість не здатні рости у відкритому ґрунті, тому будуть використані адаптивні аналоги. Наприклад, кедр ліванський можна замінити на більш морозостійкі хвойні дерева, оливкове дерево – на декоративні варіанти у контейнерах, а мирт – на зимостійкі вічнозелені кущі, такі як лавровишня. Варто зазначити, що є сорти винограду та інжиру, що добре адаптовані до умов Західного Лісостепу України і можуть бути включені до експозиції. Відтак, Біблійний ботанічний сад стане експериментальним майданчиком для вивчення акліматизації рослин.

Для теплолюбних рослин, які не можуть бути представлені фізично, передбачено виготовлення інформаційних стендів з ілюстраціями, інтерактивних елементів, що розповідатимуть про їх символічне значення у Біблії. Такий підхід дозволить зберегти освітню та культурну цінність Біблійного ботанічного саду, навіть якщо певні рослини неможливо вирощувати через кліматичні обмеження.

Висновки

Біблійний ботанічний сад Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка сприяє поширенню теологічних знань, слугує платформою для наукових досліджень та освіти, важливим простором для натхнення, роздумів і відновлення гармонії між людиною й природою в умовах сучасних викликів, є своєрідним центром збереження та відродження духовно-естетичної культури, осередком національно-патріотичного та морально-етичного виховання студентської та учнівської молоді.

Видовий склад рослин Біблійного ботанічного саду допомагає студентам вивчати ботаніку та біблійну символіку під відкритим небом, виконує важливе значення у підготовці висококваліфікованих фахівців з біології, ландшафтного дизайну, історії, релігієзнавства та інших спеціальностей і спеціалізацій, що поєднується із їх залученням до християнських цінностей, популяризації Святого Письма серед усіх верств населення, слугує базою для вивчення різноманітності рослинного світу, використання його в різних аспектах життя людини, впливу на культуру та історію, поліпшення стану навколишнього середовища та актуалізації екологічної освіти, дбайливого ставлення до рослин з метою їх охорони для майбутніх поколінь. Окрім того, видовий склад рослин Біблійного ботанічного саду ТНПУ є відображенням краси та багатства природи, вшанованої у Святому Письмі, а також осередком гармонійного поєднання духовності та природи в умовах урбанізованого середовища.

1. Барна М. М., Барна Л. С. Дендрарій Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка та перспективи створення біблійного ботанічного саду : монографія. Тернопіль : ТОВ «Терно-граф», 2017. 320 с.; іл.

2. Барна М. М., Барна Л. С. Перспективи створення біблійного ботанічного саду Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. *Тернопільські біологічні читання – Ternopil Bioscience – 2018* : матер. Всеукр. наук.-практ. конф., присвяченої 20-річчю заснування Голицького біостаніонару Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка (Тернопіль, 19–21 квіт. 2018 р.). Тернопіль : Вектор, 2018. С. 14–17.
3. Барна Микола, Барна Любов. Біблійний ботанічний сад Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка як осередок дизайн-освіти та духовно-морального виховання майбутніх педагогів. Етнодизайн у контексті відродження української національної ідентичності та європейської інтеграції: зб. наук. праць / редкол.: гол. ред. М. В. Гриньова, упоряд. і відп. ред. Є. А. Антонович, М. В. Гриньова та ін. Полтава : ПНПУ імені В. Г. Короленка, 2024. С. 6–9.
4. Барна М. М., Яворівський Р. Л., Герц Н. В. Червоні книги України. Рослинний світ (1980, 1996, 2009): таксономічні, географічні та соціологічні аспекти. *Освіта та наука на хіміко-біологічному факультеті Тернопільського національного педагогічного університету ім. Володимира Гнатюка (1940-2010)* : матер. регіон. наук.-практ. конф. (с. Гутисько Бережанського р-ну Тернопільської обл., 20–21 трав. 2010 р.). Тернопіль : Вид-во ТНПУ ім. Володимира Гнатюка, 2010. С. 12–15.
5. Визначник рослин України / А. І. Барбарич та ін.; за ред. Д. К. Зерова. Київ : Урожай, 1965. 880 с.
6. Дем'янчук П. М., Яворівський Р. Л. Соціологічна оцінка червонокнижних видів рослин Тернопільської області. *Подільський регіон : виклики XXI століття (географічні аспекти)* : матер. Всеукр. наук.-практ. конф. (Тернопіль, 25 квіт. 2017 р.). Тернопіль, 2017. С. 122–128.
7. Євангеліє / Переклад о. Івана Хоменка. Рим : Українське Біблійне Товариство, 1961. 140 с.
8. Минів Р. М., Огірко О. В. Духовно-моральне виховання студентської молоді. *Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С. З. Гжицького*. 2011. Т. 13, № 3 (49). С. 230–236.
9. Мосякін С. Л. Рослини України у світовому Червоному списку. *Український ботанічний журнал*. 1999. № 1. С. 79–88.
10. Нечитайло В. А., Кучерява Л. Ф. Ботаніка. Вищі рослини. Київ : Фітосоціоцентр, 2001. С. 320–323.
11. Пида С. В., Герц Н. В., Яворівський Р. Л., Худик П. В. Видовий склад рослин Біблійного ботанічного саду Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. *Медико-біологічні та освітні аспекти здоров'я людини в умовах війни та повоєнного часу*: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю присвячена Всесвітньому дню здоров'я (Тернопіль, 10–13 квіт. 2024) / за ред. проф. Л. Я. Федонюк. Тернопіль : ТНМУ, 2024. С. 8–12.
12. Псалтир / Переклад о. Івана Хоменка. Рим : Українське Біблійне Товариство, 1960. 85 с.
13. Рослини Святого писання та перспективи створення біблійного саду / С. Руденко та ін. Чернівці : Букрек, 2010. 420 с.; іл.
14. Словник українських наукових і народних назв судинних рослин / Ю. Кобів. Київ : Наукова думка, 2004. 800 с.
15. Червона книга України. Рослинний світ / за ред. Я. П. Дідуха. Київ : Глобалконсалтинг, 2009. 900 с.
16. Angiosperm Phylogeny Group. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the order and families of flowering –plants APG-IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*. 2016. 181 (1):1–20, doi: 10.1111/boj.12385.
17. Mosyakin S. L., Fedoronchuk M. M. Vascularplants of Ukraine. A nomenclatural checklist. Kiev : M. G. Kholodny Institute of Botany, 1999. 345 p.
18. Plants of the World Online. Board of Trustees of the Royal Botanic Gardens, Kew. Retrieved 14 May 2021.
19. Raunkiaer C. The life form of plants and statistical plant geography. Clarendon, Oxford, 1934. 632 p.

References

1. Barna M. M., Barna L. S. Dendarii Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka ta perspektyvy stvorennia bibliynoho botanichnoho sadu : monohrafiia. Ternopil : TOV «Terno-hraf», 2017. 320 s.; il.
2. Barna M. M., Barna L. S. Perspektyvy stvorennia bibliynoho botanichnoho sadu Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. *Ternopil'ski biolohichni chytannia – Ternopil Bioscience – 2018* : матер. Всеукр. наук.-практ. конф., прывсвиаченої 20-риччю заснування Holytskoho biostatsionaru Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka (Ternopil, 19–21 kvit. 2018 r.). Ternopil : Vektor, 2018. S. 14–17.
3. Barna Mykola, Barna Liubov. Bibliynyi botanichniy sad Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka yak oseredok dyzain-osvity ta dukhovno-moralnoho vykhovannia maybutnikh pedahohiv. // Etnodyzain u konteksti vidrodzhennia ukrainskoi natsionalnoi identychnosti ta

- ievropeyskoi intehratsii: zb. nauk. prats / redkol.: hol .red. M. V. Hrynova, uporiad. i vidp. red. Ie. A. Antonovych, M. V. Hrynova ta in. Poltava: PNPU imeni V. H. Korolenka, 2024. S. 6–9.
4. Barna M. M., Yavorivskiy R. L., Herts N. V. Chervoni knyhy Ukrainy. Roslynniyi svit (1980, 1996, 2009): taksonomichni, heohrafichni ta sozolahichni aspekty. *Osvita ta nauka na khimiko-biologichnomu fakulteti Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu im. Volodymyra Hnatiuka (1940-2010)* : mater. rehion. nauk.-prakt. konf. (s. Hutysko Berezhanskoho r-nu Ternopilskoi obl., 20–21 trav. 2010 r.). Ternopil : Vyd-vo TNPU im. Volodymyra Hnatiuka, 2010. S. 12–15.
 5. Vyznachnyk roslyn Ukrainy / A. I. Barbarych ta in.; za red. D. K. Zerova. Kyiv : Urozhai, 1965. 880 s.
 6. Demianchuk P. M., Yavorivskiy R. L. Sozolahichna otsinka chervonoknyzhnykh vydiv roslyn Ternopilskoi oblasti. *Podilskiy rehion : vyklyky XXI stolittia (heohrafichni aspekty)* : mater. Vseukr. nauk.-prakt. konf. (Ternopil, 25 kvit. 2017 r.). Ternopil, 2017. S. 122–128.
 7. Yevanheliie / Pereklad o. Ivana Khomenka. Rym : Ukrainske Bibliine Tovarystvo, 1961. 140 s.
 8. Myniv R. M., Ohirko O. V. Dukhovno-moralne vykhovannia studentskoi molodi. *Naukovyi visnyk LNUVMBT imeni S. Z. Gzhytskoho*, 2011. T. 13. No 3 (49). S. 230–236.
 9. Mosiakin S. L. Roslyny Ukrainy u svitovomu Chervonomu spysku. *Ukrainskyi botanichnyi zhurnal*. 1999. No 1. S. 79–88.
 10. Nechytailo V. A., Kucheriava L. F. Botanika. Vyshchi roslyny. Kyiv : Fitosotsiotsentr, 2001. S. 320–323.
 11. Pyda S. V., Herts N. V., Yavorivskiy R. L., Khudyk P. V. Vydoviy sklad roslyn Bibliynoho botanichnoho sadu Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. *Medyko-biologichni ta osviti aspekty zdorovia liudyny v umovakh viyny ta povoiennoho chasu*: materialy Vseukr. nauk.-prakt. konf. z mizhnar. uchastiu prysviachena Vsesvitnomu dniu zdorovia (Ternopil, 10–13 kvit. 2024) / za red. prof. L. Ya. Fedoniuk. Ternopil : TNMU, 2024. S. 8–12.
 12. Psaltyr / Pereklad o. Ivana Khomenka. Rym : Ukrainske Bibliine Tovarystvo, 1960. 85 s/
 13. Roslyny Sviatoho pysma ta perspektyvy stvorennia bibliynoho sadu / Svitlana Rudenko ta in. Chernivtsi : Bukrek, 2010. 420 s.; il.
 14. Slovnyk ukrainskykh naukovykh i narodnykh nazv sudynnykh roslyn / Yu. Kobiv. Kyiv : Naukova dumka, 2004. 800 s.
 15. Chervona knyha Ukrainy. Roslynniyi svit / za red. Ya. P. Didukha. Kyiv : Hlobalkonsaltnh, 2009. 900 s.
 16. Angiosperm Phylogeny Group. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the order and families of flowering –plants APG-IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*. 2016. 181 (1):1–20, doi: 10.1111/boj.12385.
 17. Mosyakin S. L., Fedoronchuk M. M. Vascularplants of Ukraine. A nomenclatural checklist. Kiev : M. G. Kholodny Institute of Botany, 1999. 345 p.
 18. Plants of the World Online. Board of Trustees of the Royal Botanic Gardens, Kew. Retrieved 14 May 2021.
 19. Raunkiaer C. The life formof plants and statistical plant geography. Claredon, Oxford, 1934. 632 p.

S. V. Pyda, N. M. Drobyk, R. L. Yavorivskiy, N. V. Herts, L. S. Barna, O. B. Matsyuk, P. V. Khudyk, O. Ya. Buchkovska

Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine

BIBLICAL BOTANICAL GARDEN OF TERNOPIL VOLODYMYR HNATIUK NATIONAL PEDAGOGICAL UNIVERSITY: FOUNDATION AND DEVELOPMENT

The article summarizes the results of a study on the history of the establishment of the Biblical Botanical Garden at Volodymyr Hnatiuk Ternopil National Pedagogical University (TNPU) and the expansion of its species composition. It is noted that the Garden of Gethsemane in Israel is the first biblical garden, founded in ancient times, and today it is one of the nine most renowned biblical botanical gardens in the world.

The first biblical botanical garden in Ukraine, and one of the largest in Europe, was inaugurated on April 4, 2011, in the town of the Blessed Virgin Mary, Mariampol, Ivano-Frankivsk Oblast. Scholars from Chernivtsi National University, including Yuriy Fedkovych, Svitlana Rudenko, Oksana Ivasyuk, Stepan Kostyshyn, and Archpriest Mykola Shcherban, were the first in Ukraine to propose the idea of creating biblical botanical gardens in higher education institutions. They elaborated on this concept in their monograph *Plants of the Holy Scriptures and Prospects for Creating a Biblical Garden*.

Professor Mykola Barna of the Department of Botany and Zoology at TNPU further developed this idea and outlined the prospects for establishing a Biblical Botanical Garden at TNPU in his monograph. The design plan for the garden was developed by Mykhailo Netribiak, an Honored

Architect of Ukraine and lecturer at the Department of Fine Arts, Design, and Methods of Teaching at TNPU, together with designer Mykhailo Tverdyi.

The foundation of the Biblical Botanical Garden at TNPU was laid on April 15, 2019, as part of the University Day celebrations, commemorating the 79th anniversary of the university's founding. The official launch of the garden was marked by the unveiling of a marble sculpture of an open book titled *The Ascension of the Lord* and an art installation depicting the Crucifixion, *Golgotha*.

Currently, 44 plant species grow in the TNPU Biblical Botanical Garden, 17 of which are mentioned in the Holy Scriptures. Four species belong to the Pinophyta division, and 13 to the Magnoliophyta division. Future plans include expanding the garden's plant collection by incorporating additional biblical species, Red Book-listed species, and ornamental flowering and deciduous trees, shrubs, and vines.

Key words: biblical botanical garden, TNPU, Holy Scriptures, creation history, biblical plants.

Надійшла 27.11.2024.

УДК 581.192: [582.998.1+ 633.88]

doi: 10.25128/2078-2357.24.3–4.10

О. В. СОРОКА, М. З. ПРОКОП'ЯК, Л. Р. ГРИЦАК, Н. М. ДРОБИК

Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка
вул. М. Кривоноса, 2, Тернопіль, 46027
e-mail: coroka912@gmail.com, drobyk.n@gmail.com

БІОЛОГІЧНО АКТИВНІ РЕЧОВИНИ ВИДІВ РОДУ *CARLINA* L. ФЛОРИ УКРАЇНИ

У статті представлено огляд літературних джерел щодо біологічно активних речовин, які синтезуються у підземній та надземній частинах лікарських рослин роду *Carlina* L. Описано хімічний склад відкасників, який включає флавоноїди, ефірні олії, терпени, сапоніни, алкалоїди, полісахариди, дубильні речовини, глікозиди, хлорогенову кислоту та інші сполуки у різних концентраціях.

Рослину сировину відкасників використовують для виготовлення сечогінних, антигельмінтних, седативних, відхаркувальних, протизапальних, антимікробних та інших лікарських засобів, які застосовують для лікування захворювань шлунково-кишкового тракту, шкірних інфекцій та гнійних висипань.

Описано обмеження використання рідкісних лікарських рослин роду *Carlina* через загрозу скорочення їх запасів. Обґрунтовано доцільність методів культивування відкасників *in vitro* для збереження біорізноманіття, стійкого виробництва БАР та розширення можливостей фармацевтичної промисловості.

Ключові слова: види роду Carlina L., біологічно активні речовини, інулін, ефірна олія, тритерпени, терпеноїди, сапоніни, флавоноїди, ксантони.

Лікарські рослини здавна використовують у традиційній медицині як джерело лікарських засобів. Вони є важливим ресурсом для відкриття та дослідження біологічно активних речовин (БАР) із цінними фармакологічними властивостями. Завдяки багатому біологічному різноманіттю, лікарські рослини продукують широкий спектр хімічних сполук. Застосування фітопрепаратів зумовлене високою біологічною активністю їхніх хімічних речовин. Ці біоактивні сполуки є цінними для терапевтичних цілей і часто використовують як попередники для біосинтезу лікарських препаратів [14, 37].

Доведено, що природні хімічні сполуки, загалом, мають менший шкідливий вплив на тваринний і людський організм, ніж їхні синтетичні аналоги, а це дозволяє застосовувати їх з лікувальною та профілактичною метою [6, 22].

БАР навіть у незначних концентраціях виявляють значну фізіологічну активність щодо окремих груп живих організмів або їхніх клітин. Їх часто класифікують як фітопродукти [10]. Більшість БАР рослин є вторинними метаболітами [21], які підвищують загальну здатність рослини виживати, адаптовуватися до несприятливих умов навколишнього середовища; забезпечують повноцінну взаємодію з навколишнім середовищем, але не беруть безпосередньої участі у рості, розвитку або розмноженні рослини. Ці речовини сприяють стійкості проти мікроорганізмів та допомагають зберегти цілісність рослинного організму в умовах безперервної дії шкідливих чинників довкілля, таких як ультрафіолетове випромінювання, високі температури, зневоднення тощо [13].

До БАР відносять ензими, вітаміни, ефірні олії, полісахариди, антраглікозиди, сапоніни, фенольні сполуки, алкалоїди, екдистероїди, лектини, флавоноїди, каротиноїди, антоціани, дубильні речовини, терпеноїди, таурин, фітоестрогени та інші. Ці групи хімічних сполук є важливими для фізіологічних процесів в організмі рослин. Незважаючи на те, що класифікація БАР все ще залишається неузгодженою, їх можна розділити на три основні категорії: терпени і терпеноїди, алкалоїди і фенольні сполуки (рис. 1) [10, 21].

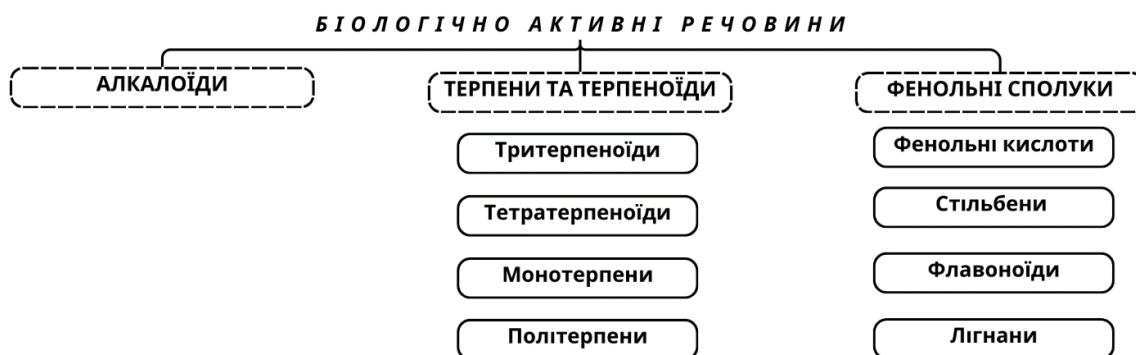


Рис. 1. Класифікація біологічно активних речовин [21].

Дослідження вмісту біологічно активних речовин у лікарських рослинах є одним із важливих етапів вдосконалення медичних засобів, що сприяє розвитку екологічно безпечному та економічно вигідному виробництву лікарських препаратів. Виявлення цінних властивостей БАР рослин, вивчення механізмів дії цих сполук дозволяє розробляти ефективніші препарати, зменшуючи ризик побічних ефектів, та розширює їхнє застосування у медицині та інших галузях. Також це забезпечує контроль якості сировини і готових продуктів.

Перспективними є дослідження БАР лікарських рослин з роду *Carlina* L. (родина Айстрові Asteraceae або Складноцвіті Compositae). Згідно із сучасними дослідженнями відомо, що види цього роду містять велику кількість фармакологічно цінних БАР різних груп у підземній та надземній частинах рослин [8, 9, 15, 16, 20, 29, 39, 40]. Це зумовлює комерційне використання відкасників при виготовленні настоянок, екстрактів та інших фітопрепаратів таких, як: настоянка «Swedish Bitters» (Nature's Way, NatureWorks), водний екстракт «Flora» (Maria's Original Formula), «Carlina Thistle» (HerbalTerra); креми та мазі для зовнішнього застосування («Eberwurz Salbe», St. Severin; «Carlina Thistle (Carlina)», Bianca Rosa).

Метою дослідження є пошук та аналіз літературних джерел, що стосуються біологічно активних речовин, які синтезуються у підземній та надземній частинах лікарських рослин роду *Carlina*.

Рід *Carlina* налічує понад 30 видів, ареали яких охоплюють територію Європи. На території України зростають у західній та правобережній її частинах, трапляються у південній частині Полісся, на Поділлі та у межах Карпатської гірської системи [1, 3, 40]. На території України поширені такі представники роду *Carlina*: відкасник татарниколистий або дев'ятисил татарниколистий (*Carlina onopordifolia* Besser ex Szafer, Kulcz. et Pawł), відкасник

осотоподібний або дев'ятисил осотовий (*Carlina cirsioides* Klokov), відкасник безстебловий або дев'ятисил безстебловий (*Carlina acaulis* L.).

C. onopordifolia та *C. cirsioides* занесено до Червоної книги України (2009 р.) [3] як види із вразливим природоохоронним статусом (рис. 2). Крім цього, вони включені до Червоного списку Міжнародного союзу охорони природи та природних ресурсів (англ. *International Union for Conservation of Nature and Natural Resources*, IUCN). Також відбувається прогресуюче скорочення чисельності *C. acaulis*, який є регіонально-рідкісним [1, 3, 42].



Рис. 2. Представники роду *Carlina*, занесені до Червоної книги України:
1 – відкасник татарниколистий; 2 – відкасник осотоподібний; 3 – відкасник безстебловий [3, 18].

У видах роду *Carlina* у різних концентраціях ідентифікована велика кількість БАР різних груп, а саме: флавоноїди, ефірні олії, терпени та терпеноїди, сапоніни, алкалоїди, полісахариди, дубильні та смолисті речовини, глікозиди, кетонів, поліацетиленові та альдегідні сполуки [8, 9, 15, 16, 20, 29, 39, 40].

Згідно з сучасними дослідженнями у найбільшій кількості у коренях відкасників виявлено інулін, вміст якого становить 12–22 % (рис. 3) [15, 16, 29]. Це резервний полісахарид, полімер D-фруктози (фруктан). Молекулярна формула – $C_{6n}H_{10n+2}O_{5n+1}$.

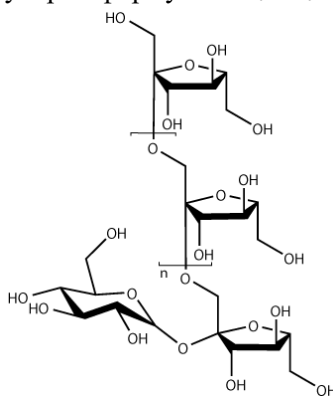


Рис. 3. Структурна формула інуліну [25].

Інулін містить залишки β -D-фруктофуранози, зв'язані 1→2 глікозидними зв'язками, полімерний ланцюг якого закінчується залишком α -D-глюкози, що не окиснюється [2].

Завдяки наявності цих зв'язків, інулін не перетравлюється ензимами травної системи людини, що зумовлює його властивості: знижену калорійність, підтримку оптимальної біфідобактеріальної мікрофлори шлунково-кишкового тракту та пребіотичний вплив. Численні дослідження підтверджують, що інулін є ефективним пребіотиком і широко використовується у медицині. Встановлено, що інулін при споживанні допомагає знизити рівень глюкози та ліпопротеїнів низької щільності. Завдяки цим властивостям його використовують при таких

ОГЛЯДИ

захворюваннях, як цукровий діабет, атеросклероз та ожиріння. Інулін має антикоагулянтну, імуномодулюючу, протипухлинну та протизапальну дії [30, 36].

За допомогою методу гідродистилляції з кореня відкасників отримують ефірну олію (1–5 %) – рідину жовтого кольору зі стійким запахом. У таблиці 1 відображено вміст основних її хімічних компонентів [9, 15, 16, 39, 40].

Таблиця 1

Компоненти ефірної олії коренів видів роду *Carlina*

Тривіальна назва речовин	Міжнародна назва речовин	Вміст, %
карліна оксид	2-(3-фенілпроп-1-ініл)фуран	85–98 %
β-сесквіфелландрен	3-(6-метилгепт-5-ен-2-іл)-6-метиліденциклогексен	1,5–2,8 %
α-зінгіберен	(5S)-2-метил-5-[(2R)-6-метилгепт-5-ен-2-іл]циклогекса-1,3-дієн	1,0–2,4 %
бензойний альдегід	бензальдегід	1,2–3,1 %
α-куркумен	1-метил-4-[(2S)-6-метилгепт-5-ен-2-іл]бензол	0,4–1,6 %
γ-куркумен	1-метил-4-[(2R)-6-метилгепт-5-ен-2-іл]циклогекса-1,3-дієн	0,5–1,1 %
β-фарнезен	(6E)-7,11-диметил-3-метилідендодека-1,6,10-трієн	0,1–0,4 %
β-бісаболєн	1-метил-4-(1-метилєн-5-метил-4-гексеніл)циклогекс-1-єн	0,01–0,1 %

Встановлено, що поліацетилен карліна оксид (2-(3-фенілпроп-1-ініл)фуран, бензил-2-фурацителєн) міститься у коренях відкасників у переважній більшості (до 98 %), порівнюючи з іншими БАР (рис. 4). Це органічна речовина, яка виявляє антимікробну, протигрибкову, протизапальну, противиразкову та антиоксидантну активність, є інгібітором ацетилхолінєстерази (КФ 3.1.1.7). Виявлено високу ефективність використання поліацетилену карліна оксид проти виду паразитичних одноклітинних організмів, що спричиняють сонну хворобу людини (*Trypanosoma brucei* Plimmer & Bradford), метицилін-резистентного грам-позитивного аеробного золотистого стафілококу (*Staphylococcus aureus* Rosenbach), грам-негативної аеробної палички синьогнійної (*Pseudomonas aeruginosa* (Schroeter) Migula), грам-позитивного аеробного стрептокока групи А (*Streptococcus pyogenes* Rosenbach), грибків, що спричиняють інфекційно-запальне ураження уrogenітального тракту (*Candida glabrata* (H. W. Anderson) S. A. Mey. & Yarrow та *Candida albicans* (C. P. Robin) Berkhout) [8, 11, 20, 29, 41, 45].

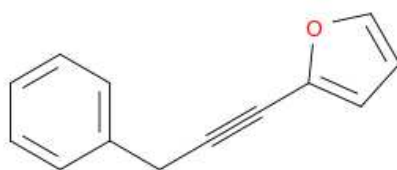


Рис. 4. Структурна формула головного компонента ефірної олії відкасників – карліна оксид [12].

В ефірній олії коренів видів роду визначено велику кількість терпєнових компонентів, таких як β-сєсквіфєлландрєн, α-зінгіберєн, β-фарнезен, α-куркумен, γ-куркумен, β-бісаболєн [40].

Згідно з результатами досліджень багатьох науковців, α-зінгіберєн сприяє зниженню запальних процесів, захищає клітини від ушкодження вільними радикалами, демонструє антибактеріальну та протигрибкову дію, що робить його корисним для підтримки імунної системи. β-сєсквіфєлландрєн здійснює інгібування пухлин. β-фарнезен є природним

репелентом для деяких комах. Завдяки цим властивостям, може застосовуватися як екологічно безпечний інсектицид. α -куркумен, γ -куркумен відомі своєю здатністю до антиоксидантної дії, зменшення запалення. Ці сполуки виявляють антибактеріальну та протигрибкову активність. β -бісаболен – це природна хімічна речовина з бальзамічним запахом, із протипухлинними властивостями та бактерицидною активністю [17, 28, 31, 34, 38].

Надземна частина рослин роду *Carlina* також містить у хімічному складі терпени, у листках визначено велику кількість тритерпенів. Ідентифіковані сполуки, їх вміст та властивості підсумовано у таблиці 2 [40].

Таблиця 2

Біологічно активні речовини – тритерпени у надземних органах видів роду *Carlina*

Тривіальна назва речовин	Вміст, мг/г	Властивості
урсолова кислота	1,35–6,89	протизапальні, антиоксидантні, антиканцерогенні [35]
олеанолова кислота	0,62–2,89	пригнічення гліюконеогенезу та сприяння утилізації гліюкози; антибактеріальна, протипухлинна активність [4, 7]
бетулінова кислота	0,11–0,29	протизапальна, антимікробна, цитотоксична дія на різні клітинні лінії пухлин [19]
α -амірин, β -амірин	0,07	протипухлинна, протизапальна, гепатопротекторна дія [43]
ацетат лупеолу	0,06–0,33	протизапальна, антибактеріальна дія [26]
лупеол	0,05–0,33	протизапальний потенціал; протизапальна, протиракова, протидіабетична дія; запобігання захворюванням серця, нирковій та печінковій токсичності [33]

Отже, зазначені терпени, виділені із рослин відкашників, володіють здебільшого антисептичною, протизапальною, протипухлинною та спазмолітичною дією.

Як слідові БАР у коренях визначено представників кетонних сполук ацетофенону і бензилметилкетону, ароматичний альдегід – бензальдегід. Також визначено дубильні та смолисті речовини [8]. Ацетофенон (метилфенілкетон, $C_6H_5COCH_3$) володіє снодійною дією, а бензилметилкетон (фенілацетон, $C_6H_5CH_2COCH_3$) використовують у фармацевтичній промисловості в деяких країнах під час виготовлення лікарських засобів групи психостимуляторів. Бензальдегід (C_6H_5CHO) інколи використовує в синтезі деяких ліків, відтак може бути вихідною сировиною для фармацевтичної продукції [27, 38].

Корені та надземні органи відкашників є джерелом хлорогенової кислоти (вміст 1,94 %), яка має антиоксидантні властивості. Ферментативно окислені форми цієї кислоти виявляють антивірусну активність щодо збудників герпесу [32].

У коренях відкашників ідентифіковано невелику кількість тритерпенових сапонінів. Ці БАР є одними з найбільш ефективних гіполіпідемічних засобів рослинного походження, які застосовують у комплексній терапії серцево-судинних захворювань [44]. Відкашники синтезують ацетиленові похідні лупеолу (0,067-0,22 мг/г) та β -амірину (0,10–0,35 мг/г). Дослідниками з'ясовано широкий спектр протипухлинної, антиоксидантної, протизапальної та антимікробної активності лупеолу [23]. Бета-амірин – це пентациклічна тритерпеноїдна сполука, яка відома своїми потенційними антидепресантними ефектами [5]. Ідентифіковані у надземних органах відкашників сапоніни відомі нейротрофічними, відхаркувальними та антибактеріальними властивостями.

У підземній та надземній частинах рослин роду *Carlina* ідентифіковано алкалоїди і флавоноїди. Алкалоїди, як правило, містяться в рослинах у вигляді солей органічних кислот, а також в складі глікозидів. У медичній практиці рослинну сировину, що містить ці речовини, застосовують як лікувальний засіб з протизапальною, седативною, тонізуючою і діуретичною дією [21]. Флавоноїди є однією з найпоширеніших груп фенольних сполук, отриманих із надземних органів рослин видів роду *Carlina*. Вони є ефективними антимікробними речовинами проти широкого спектру мікроорганізмів. Також, завдяки високому окислювально-відновному потенціалу, флавоноїди є важливим джерелом антиоксидантів. Споживання флавоноїдів у великих кількостях допомагає запобігти онкологічним та серцево-судинним захворюванням. Основні флавоноїди у листках рослин представлені глікозидними флавонами,

а саме: орієнтином, гомоорієнтином і вітексином, які мають антиоксидантні, протівірусні, антибактеріальні та знеболювальні властивості. Крім цього, у листках виявлено апігенін, що характеризується високою біологічною активністю, взаємодіє з молекулярними мішенями в організмі, проявляючи протизапальні, антиоксидантні та нейропротекторні фармакологічні властивості [21, 24, 46, 47].

Висновки

Ідентифіковані БАР у рослинах видів роду *Carlina* зумовлюють їхнє широке використання в медицині багатьох країн, зокрема в Україні. На основі фармакологічно цінних БАР, отриманих із відкашників, виготовляють сечогінні, антигельмінтні, седативні, відхаркувальні, протизапальні, знеболювальні, потогінні, протигемороїдальні, антимікробні лікарські засоби тощо. Фітопрепарати на основі відкашників також використовують для лікування шлунково-кишкових розладів. Крім цього, їх застосовують для промивання різних уражень шкіри.

Однак практичне значення та використання рідкісних лікарських рослин роду *Carlina* обмежене через загрозу скорочення їх запасів. Масовий збір у природі може призвести до повної втрати цих видів. Культури клітин, тканин та органів відкашників є альтернативними джерелами цінних БАР. Культивування *in vitro* дозволяє забезпечувати контрольовані умови середовища – температуру, вологість, освітлення і склад живильних середовищ, що сприяє підвищенню концентрації бажаних БАР у рослинах. У культурі *in vitro* ці показники є стабільними, що дозволяє отримувати лікарські препарати з постійною концентрацією активних компонентів.

Таким чином, використання методів культивування *in vitro* для рідкісних лікарських рослин є важливим інструментом для стійкого виробництва БАР, збереження біорізноманіття та розширення можливостей фармацевтичної промисловості.

1. Колісник Х. М., Прокоп'як М. З., Грицак Л. Р., Дробик Н. М. Хорология та біоекологічні особливості видів роду *Carlina* L. флори України. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія Біологія*. 2024. Т. 83, № 3–4. С. 48–57. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.23.3-4.6>.
2. Сабат М. Я., Іскра Р. Я. Фруктани: хімічна структура, біологічні властивості та метаболізм кишковою мікрофлорою. *Біологічні студії*. 2016. Т. 10, № 2. С. 203–214. <https://doi.org/10.30970/sbi.1002.486>.
3. Червона книга України. Рослинний світ / за ред. Я. П. Дідуха. Київ : Глобалконсалтинг, 2009. 900 с.
4. Akhtar N., Mohammed A. A. S., Khan R. A., Yusuf M., Singh V., Mohammed H. A., Al-Omar M. S., Abdellatif A. A. H., Naz M., Khadri H. Self-Generating nano-emulsification techniques for alternatively-routed, bioavailability enhanced delivery, especially for anti-cancers, anti-diabetics, and miscellaneous drugs of natural, and synthetic origins. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2020. Vol. 58. P. 101808. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2020.101808>.
5. Ana B. Ramos-Hryb, Mauricio P. Cunha, Manuella P. Kaster, Ana Lúcia S Rodrigues. Natural Polyphenols and Terpenoids for Depression Treatment: Current Status. *Studies in Natural Products Chemistry*. 2018. P. 181–221. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64068-0.00006-1>.
6. Atanasov A. G., Zotchev S. B., Dirsch V. M., Supuran C. T. Natural products in drug discovery: advances and opportunities. *Nature Reviews Drug Discovery*. 2021. Vol. 20, No 3. P. 200–216. <https://doi.org/10.1038/s41573-020-00114-z>.
7. Ayeleso T., Matumba M. Oleanolic Acid and Its Derivatives: Biological Activities and Therapeutic Potential in Chronic Diseases. *Molecules*. 2017. Vol. 22, No 11. P. 1915. <https://doi.org/10.3390/molecules22111915>.
8. Benelli G., Pavela R., Petrelli R., Nzekoue F. K., Cappellacci L., Lupidi G., Quassinti L., Bramucci M., Sut S., Dall'Acqua S., Canale A., Maggi F. *Carlina* oxide from *Carlina acaulis* root essential oil acts as a potent mosquito larvicide. *Industrial Crops and Products*. 2019. Vol. 137. P. 356–366. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.037>.
9. Benelli G., Rizzo R., Zeni V., Govigli A., Samková A., Sinacori M., Verde L. G., Pavela R., Cappellacci L., Petrelli R., Spinozzi E., Morshedloo M. R., Maggi Filippo, Canale A. *Carlina acaulis* and *Trachyspermum ammi* essential oils formulated in protein baits are highly toxic and reduce aggressiveness in the medfly, *Ceratitis capitata*. *Industrial Crops and Products*. 2021. Vol. 161. P. 113191. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113191>.

10. Biesalski H.-K., Dragsted L. O., Elmadfa I., Grossklaus R., Müller M., Schrenk D., Walter P., Weber P. Bioactive compounds: Definition and assessment of activity. *Nutrition*. 2009. Vol. 25, No. 11–12. P. 1202–1205. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2009.04.023>.
11. Bohlmann F., Schuster A., Meusel H. A carlina oxide derivative from *Carlina diae*. *Phytochemistry*. 1981. Vol. 20, No. 4. P. 823–824. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(81\)85186-2](https://doi.org/10.1016/0031-9422(81)85186-2).
12. Carlina oxide Structure. *Mol-Instincts*. <https://www.molinstincts.com/structure/Carlina-oxide-cstr-CT1000773185.html> (Last accessed: 12.09.2024).
13. Chaachouay N., Zidane L. Plant-Derived Natural Products: A Source for Drug Discovery and Development. *Drugs and Drug Candidates*. 2024. Vol. 3, No. 1. P. 184–207. <https://doi.org/10.3390/ddc3010011>.
14. Dar R. A., Shahnawaz M., Ahanger M. A., Majid ul I. Exploring the Diverse Bioactive Compounds from Medicinal Plants: A Review. *The Journal of Phytopharmacology*. 2023. Vol. 12, No. 3. P. 189–195. <https://doi.org/10.31254/phyto.2023.12307>.
15. Djordjevic S., Petrovic S., Ristic, D. M. Composition of *Carlina acanthifolia* Root Essential Oil. *Chemistry of Natural Compounds*. 2005. Vol. 41, No. 4. P. 410–412. <https://doi.org/10.1007/s10600-005-0163-2>.
16. Đorđević S., Petrović S., Dobrić S., Milenković M., Vučićević D., Žižić S., Kukić J. Antimicrobial, anti-inflammatory, anti-ulcer and antioxidant activities of *Carlina acanthifolia* root essential oil. *Journal of Ethnopharmacology*. 2007. Vol. 109, No. 3. P. 458–463. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2006.08.021>.
17. Ferreira B. A., Ferreira R. S., de Moura F. B. R., Narduchi C. T., Deconte S. R., Sartorelli P., Tomiosso T. C., Lago J. H. G., Araújo F. de A. α -zingiberene, a sesquiterpene from essential oil from leaves of *Casearia sylvestris*, suppresses inflammatory angiogenesis and stimulates collagen deposition in subcutaneous implants in mice. *Natural Product Research*. 2021. C. 1–5. <https://doi.org/10.1080/14786419.2021.2019729>.
18. Herbal & Natural Medicine. *herbal-organic.com*. URL: <http://www.herbal-organic.com> (Last accessed: 09.06.2024).
19. Jit B. P., Pattnaik S., Arya R., Dash R., Sahoo S. S., Pradhan B., Bhuyan P. P., Behera P. K., Jena M., Sharma A., Agrawal P. K., Behera R. K. Phytochemicals: A potential next generation agent for radioprotection. *Phytomedicine*. 2022. P. 154188. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2022.154188>.
20. Kavallieratos N. G., Nika Erifili P., Skourti A., Spinozzi E., Ferrati M., Petrelli R., Maggi F., Benelli G. *Carlina acaulis* essential oil: a candidate product for agrochemical industry due to its pesticidal capacity. *Industrial Crops and Products*. 2022. Vol. 188. P. 115572. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115572>.
21. Kumar A., Ahmad F., Zaidi S. Importance of Bioactive Compounds Present in Plant Products and Their Extraction – A Review. *Agricultural Reviews*. 2019. Vol. 40, No. 04. <https://doi.org/10.18805/ag.r-1926>.
22. Lahlou M. Screening of natural products for drug discovery. *Expert Opinion on Drug Discovery*. 2007. Vol. 2, No. 5. P. 697–705. <https://doi.org/10.1517/17460441.2.5.697>.
23. Liu K., Zhang X., Xie L., Deng M., Chen H., Song J., Long J., Li X., Luo J. Lupeol and its derivatives as anticancer and anti-inflammatory agents: Molecular mechanisms and therapeutic efficacy. *Pharmacological Research*. 2021. Vol. 164. P. 105373. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2020.105373>.
24. Marinho L. de F., Sganzerla W. G., Ferreira V. C., Moreno J. A. J., Rostagno M. A., Forster-Carneiro T. Advances in green extraction methods, biological properties, and applications of betanin and vitexin: An updated review and bibliometric analysis. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2023. P. 102744. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102744>.
25. Moldoveanu S. C. Analytical pyrolysis of polymeric carbohydrates. *Analytical Pyrolysis of Natural Organic Polymers*. 2021. P. 111–269. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818571-1.00004-2>.
26. Muktar B., Bello I., Sallau M. Isolation, characterization and antimicrobial study of lupeol acetate from the root bark of Fig-Mulberry Sycamore (*Ficus sycomorus* LINN). *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*. 2018. Vol. 22, No. 7. P. 1129. <https://doi.org/10.4314/jasem.v22i7.21>.
27. NCATS Inxight Drugs – Benzaldehyde. *Inxight Drugs*. URL: <https://drugs.ncats.io/drug/TA269SD04T> (Last accessed: 03.09.2024).
28. Nuutinen T. Medicinal properties of terpenes found in *Cannabis sativa* and *Humulus lupulus*. *European Journal of Medicinal Chemistry*. 2018. Vol. 157. P. 198–228. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2018.07.076>.
29. Pavela R., Maggi F., Petrelli R., Cappellacci L., Buccioni M., Palmieri A., Canale A., Benelli G. Outstanding insecticidal activity and sublethal effects of *Carlina acaulis* root essential oil on the housefly, *Musca domestica*, with insights on its toxicity on human cells. *Food and Chemical Toxicology*. 2020. Vol. 136. P. 111037. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.111037>.
30. Qin Y.-Q., Wang L.-Y., Yang X.-Y., Xu Y.-J., Fan G., Fan Y.-G., Ren J.-N., An Q., Li X. Inulin: Properties and health benefits. *Food & Function*. 2023. <https://doi.org/10.1039/d2fo01096h>.

31. Rani K. Cyclisation of farnesyl pyrophosphate into sesquiterpenoids in ginger rhizomes (*Zingiber officinale*). *Fitoterapia*. 1999. Vol. 70, No. 6. P. 568–574. [https://doi.org/10.1016/s0367-326x\(99\)00090-8](https://doi.org/10.1016/s0367-326x(99)00090-8).
32. Safitri E., Purnobasuki H., Al-Anshori A. A., Lestari T. D., Utama S., Yimer N. Honey-derived phytochemicals: Implications for stem cell activation and health benefits. *Journal of Functional Foods*. 2024. Vol. 114. P. 106058. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2024.106058>.
33. Saleem M. Lupeol, a novel anti-inflammatory and anti-cancer dietary triterpene. *Cancer Letters*. 2009. Vol. 285, No. 2. P. 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.canlet.2009.04.033>.
34. Sansinenea E., Cabrera Vivas B. M., Ortiz A. A Natural Curcumin Bisabolane Sesquiterpene: Syntheses and Recent Applications. *Current Organic Synthesis*. 2015. Vol. 12, No. 4. P. 431–439. <https://doi.org/10.2174/157017941204150522185129>.
35. Seo D. Y., Lee S. R., Heo J.-W., No M.-H., Rhee B. D., Ko K. S., Kwak H.-B., Han J. Ursolic acid in health and disease. *The Korean Journal of Physiology & Pharmacology*. 2018. Vol. 22, No. 3. P. 235. <https://doi.org/10.4196/kjpp.2018.22.3.235>.
36. Shoaib M., Shehzad A., Omar M., Rakha A., Raza H., Sharif H. R., Shakeel A., Ansari A., Niazi S. Inulin: Properties, health benefits and food applications. *Carbohydrate Polymers*. 2016. Vol. 147. P. 444–454. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.020>.
37. Sofowora A., Ogunbodede E., Onayade A. The role and place of medicinal plants in the strategies for disease prevention. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines*. 2013. Vol. 10, No. 5. <https://doi.org/10.4314/ajtcam.v10i5.2>.
38. Soucy N. V. Acetophenone. *Encyclopedia of Toxicology*. 2014. P. 43–45. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-386454-3.01157-x>.
39. Spinozzi E., Ferrati M., Cappellacci L., Caselli A., Perinelli D. R., Bonacucina G., Maggi F., Strzemeski M., Petrelli R., Pavela R., Desneux N., Benelli G. *Carlina acaulis* L. (Asteraceae): biology, phytochemistry, and application as a promising source of effective green insecticides and acaricides. *Industrial Crops and Products*. 2023. Vol. 192. P. 116076. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116076>.
40. Strzemeski M., Wójciak-Kosior M., Sowa I., Rutkowska E., Szwerc W., Kocjan R., Latalski M. *Carlina* species as a new source of bioactive pentacyclic triterpenes. *Industrial Crops and Products*. 2016. Vol. 94. P. 498–504. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.025>.
41. Strzemeski M., Wójciak-Kosior M., Sowa I., Załuski D., Verpoorte R. Historical and traditional medical applications of *Carlina acaulis* L. – A critical ethnopharmacological review. *Journal of Ethnopharmacology*. 2019. Vol. 239. P. 111842. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2019.111842>.
42. The IUCN Red List of Threatened Species. *IUCN Red List of Threatened Species*. URL: <https://www.iucnredlist.org/> (Last accessed: 10.08.2024).
43. Viet T. D., Xuan T. D., Anh L. H. α -Amyrin and β -Amyrin Isolated from *Celastrus hindsii* Leaves and Their Antioxidant, Anti-Xanthine Oxidase, and Anti-Tyrosinase Potentials. *Molecules*. 2021. T. 26, No. 23. P. 7248. <https://doi.org/10.3390/molecules26237248>.
44. Vincken J.-P., Heng L., de Groot A., Gruppen H. Saponins, classification and occurrence in the plant kingdom. *Phytochemistry*. 2007. Vol. 68, No. 3. P. 275–297. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2006.10.008>.
45. Wnorowski A., Wnorowska S., Wojas-Krawczyk K., Grenda A., Staniak M., Michalak A., Woźniak S., Matosiuk D., Biała G., Wójciak M., Sowa I., Krawczyk P., Strzemeski M. Toxicity of *Carlina* Oxide—A Natural Polyacetylene from the *Carlina acaulis* Roots—In Vitro and in Vivo Study. *Toxins*. 2020. Vol. 12, No. 4. P. 239. <https://doi.org/10.3390/toxins12040239>.
46. Xiao L., Chen X.-J., Feng J.-K., Li W.-N., Yuan S., Hu Y. Natural products as the calcium channel blockers for the treatment of arrhythmia: Advance and prospect. *Fitoterapia*. 2023. P. 105600. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2023.105600>.
47. Zhang X., Gao Y., Zhou Y., Liu Z., Liu R. Pharmacological mechanism of natural drugs and their active ingredients in the treatment of arrhythmia via calcium channel regulation. *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2023. Vol. 160. P. 114413. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2023.114413>.

References

1. Kolisnyk Kh. M., Prokopiak M. Z., Hrytsak L. R., Drobyk N. M. Khorolohiia ta bioekolohichni osoblyvosti vydiv rodu *Carlina* L. flory Ukrainy. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Seriya Biolohiia*. 2024. T. 83, No 3–4. S. 48–57. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.23.3-4.6>. [in Ukrainian]
2. Sabat M. Ya., Iskra R. Ya. Fruktany: khimichna struktura, biolohichni vlastyvoli ta metabolizm kyshkovoio mikroflorioiu. *Biolohichni studii*. 2016. T. 10, No 2. S. 203–214. <https://doi.org/10.30970/sbi.1002.486>. [in Ukrainian]

3. Chervona knyha Ukrainy. Roslynni svit / za red. Ya. P. Didukha. K. : Hlobalkonsaltnyh, 2009. 900 s. [in Ukrainian]
4. Akhtar N., Mohammed A. A. S., Khan R. A., Yusuf M., Singh V., Mohammed H. A., Al-Omar M. S., Abdellatif A. A. H., Naz M., Khadri H. Self-Generating nano-emulsification techniques for alternatively-routed, bioavailability enhanced delivery, especially for anti-cancers, anti-diabetics, and miscellaneous drugs of natural, and synthetic origins. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2020. Vol. 58. P. 101808. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2020.101808>.
5. Ana B. Ramos-Hryb, Mauricio P. Cunha, Manuella P. Kaster, Ana Lúcia S Rodrigues. Natural Polyphenols and Terpenoids for Depression Treatment: Current Status. *Studies in Natural Products Chemistry*. 2018. P. 181–221. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64068-0.00006-1>.
6. Atanasov A. G., Zotchev S. B., Dirsch, V. M., Supuran C. T. Natural products in drug discovery: advances and opportunities. *Nature Reviews Drug Discovery*. 2021. Vol. 20, No 3. P. 200–216. <https://doi.org/10.1038/s41573-020-00114-z>.
7. Ayeleso T., Matumba M. Oleanolic Acid and Its Derivatives: Biological Activities and Therapeutic Potential in Chronic Diseases. *Molecules*. 2017. Vol. 22, No 11. P. 1915. <https://doi.org/10.3390/molecules22111915>.
8. Benelli G., Pavela R., Petrelli R., Nzekoue F. K., Cappellacci L., Lupidi G., Quassinti L., Bramucci M., Sut S., Dall'Acqua S., Canale A., Maggi F. Carlina oxide from *Carlina acaulis* root essential oil acts as a potent mosquito larvicide. *Industrial Crops and Products*. 2019. Vol. 137. P. 356–366. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.037>.
9. Benelli G., Rizzo R., Zeni V., Govigli A., Samková A., Sinacori M., Verde L. G., Pavela R., Cappellacci L., Petrelli R., Spinozzi E., Morshedloo M. R., Maggi Filippo, Canale A. *Carlina acaulis* and *Trachyspermum ammi* essential oils formulated in protein baits are highly toxic and reduce aggressiveness in the medfly, *Ceratitis capitata*. *Industrial Crops and Products*. 2021. Vol. 161. P. 113191. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113191>.
10. Biesalski H.-K., Dragsted L. O., Elmadfa I., Grossklaus R., Müller M., Schrenk D., Walter P., Weber P. Bioactive compounds: Definition and assessment of activity. *Nutrition*. 2009. Vol. 25, No. 11–12. P. 1202–1205. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2009.04.023>.
11. Bohlmann F., Schuster A., Meusel H. A carlina oxide derivative from *Carlina diae*. *Phytochemistry*. 1981. Vol. 20, No. 4. P. 823–824. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(81\)85186-2](https://doi.org/10.1016/0031-9422(81)85186-2).
12. Carlina oxide Structure. *Mol-Instincts*. <https://www.molinstincts.com/structure/Carlina-oxide-cstr-CT1000773185.html> (Last accessed: 12.09.2024).
13. Chaachouay N., Zidane L. Plant-Derived Natural Products: A Source for Drug Discovery and Development. *Drugs and Drug Candidates*. 2024. Vol. 3, No. 1. P. 184–207. <https://doi.org/10.3390/ddc3010011>.
14. Dar R. A., Shah Nawaz M., Ahanger M. A., Majid ul I. Exploring the Diverse Bioactive Compounds from Medicinal Plants: A Review. *The Journal of Phytopharmacology*. 2023. Vol. 12, No. 3. P. 189–195. <https://doi.org/10.31254/phyto.2023.12307>.
15. Djordjevic S., Petrovic S., Ristic, D. M. Composition of *Carlina acanthifolia* Root Essential Oil. *Chemistry of Natural Compounds*. 2005. Vol. 41, No. 4. P. 410–412. <https://doi.org/10.1007/s10600-005-0163-2>.
16. Đorđević S., Petrović S., Dobrić S., Milenković M., Vučićević D., Žižić S., Kukić J. Antimicrobial, anti-inflammatory, anti-ulcer and antioxidant activities of *Carlina acanthifolia* root essential oil. *Journal of Ethnopharmacology*. 2007. Vol. 109, No. 3. P. 458–463. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2006.08.021>.
17. Ferreira B. A., Ferreira R. S., de Moura F. B. R., Narduchi C. T., Deconte S. R., Sartorelli P., Tomiosso T. C., Lago J. H. G., Araújo F. de A. α -zingiberene, a sesquiterpene from essential oil from leaves of *Casearia sylvestris*, suppresses inflammatory angiogenesis and stimulates collagen deposition in subcutaneous implants in mice. *Natural Product Research*. 2021. C. 1–5. <https://doi.org/10.1080/14786419.2021.2019729>.
18. Herbal & Natural Medicine. *herbal-organic.com*. URL: <http://www.herbal-organic.com> (Last accessed: 09.06.2024).
19. Jit B. P., Pattnaik S., Arya R., Dash R., Sahoo S. S., Pradhan B., Bhuyan P. P., Behera P. K., Jena M., Sharma A., Agrawal P. K., Behera R. K. Phytochemicals: A potential next generation agent for radioprotection. *Phytomedicine*. 2022. P. 154188. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2022.154188>.
20. Kavallieratos N. G., Nika Erifili P., Skourti A., Spinozzi E., Ferrati M., Petrelli R., Maggi F., Benelli G. *Carlina acaulis* essential oil: a candidate product for agrochemical industry due to its pesticidal capacity. *Industrial Crops and Products*. 2022. Vol. 188. P. 115572. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115572>.
21. Kumar A., Ahmad F., Zaidi S. Importance of Bioactive Compounds Present in Plant Products and Their Extraction – A Review. *Agricultural Reviews*. 2019. Vol. 40, No. 04. <https://doi.org/10.18805/ag.r-1926>.

22. Lahlou M. Screening of natural products for drug discovery. *Expert Opinion on Drug Discovery*. 2007. Vol. 2, No. 5. P. 697–705. <https://doi.org/10.1517/17460441.2.5.697>.
23. Liu K., Zhang X., Xie L., Deng M., Chen H., Song J., Long J., Li X., Luo J. Lupeol and its derivatives as anticancer and anti-inflammatory agents: Molecular mechanisms and therapeutic efficacy. *Pharmacological Research*. 2021. Vol. 164. P. 105373. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2020.105373>.
24. Marinho L. de F., Sganzerla W. G., Ferreira V. C., Moreno J. A. J., Rostagno M. A., Forster-Carneiro T. Advances in green extraction methods, biological properties, and applications of betanin and vitexin: An updated review and bibliometric analysis. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2023. P. 102744. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102744>.
25. Moldoveanu S. C. Analytical pyrolysis of polymeric carbohydrates. *Analytical Pyrolysis of Natural Organic Polymers*. 2021. P. 111–269. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818571-1.00004-2>.
26. Muktar B., Bello I., Sallau M. Isolation, characterization and antimicrobial study of lupeol acetate from the root bark of Fig-Mulberry Sycamore (*Ficus sycomorus* LINN). *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*. 2018. Vol. 22, No. 7. P. 1129. <https://doi.org/10.4314/jasem.v22i7.21>.
27. NCATS Inxight Drugs – Benzaldehyde. *Inxight Drugs*. URL: <https://drugs.ncats.io/drug/TA269SD04T> (Last accessed: 03.09.2024).
28. Nuutinen T. Medicinal properties of terpenes found in *Cannabis sativa* and *Humulus lupulus*. *European Journal of Medicinal Chemistry*. 2018. Vol. 157. P. 198–228. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2018.07.076>.
29. Pavela R., Maggi F., Petrelli R., Cappellacci L., Buccioni M., Palmieri A., Canale A., Benelli G. Outstanding insecticidal activity and sublethal effects of *Carlina acaulis* root essential oil on the housefly, *Musca domestica*, with insights on its toxicity on human cells. *Food and Chemical Toxicology*. 2020. Vol. 136. P. 111037. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.111037>.
30. Qin Y.-Q., Wang L.-Y., Yang X.-Y., Xu Y.-J., Fan G., Fan Y.-G., Ren J.-N., An Q., Li X. Inulin: Properties and health benefits. *Food & Function*. 2023. <https://doi.org/10.1039/d2fo01096h>.
31. Rani K. Cyclisation of farnesyl pyrophosphate into sesquiterpenoids in ginger rhizomes (*Zingiber officinale*). *Fitoterapia*. 1999. Vol. 70, No. 6. P. 568–574. [https://doi.org/10.1016/s0367-326x\(99\)00090-8](https://doi.org/10.1016/s0367-326x(99)00090-8).
32. Safitri E., Purnobasuki H., Al-Anshori A. A., Lestari T. D., Utama S., Yimer N. Honey-derived phytochemicals: Implications for stem cell activation and health benefits. *Journal of Functional Foods*. 2024. Vol. 114. P. 106058. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2024.106058>.
33. Saleem M. Lupeol, a novel anti-inflammatory and anti-cancer dietary triterpene. *Cancer Letters*. 2009. Vol. 285, No. 2. P. 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.canlet.2009.04.033>.
34. Sansinenea E., Cabrera Vivas B. M., Ortiz A. A Natural Curcumene Bisabolane Sesquiterpene: Syntheses and Recent Applications. *Current Organic Synthesis*. 2015. Vol. 12, No. 4. P. 431–439. <https://doi.org/10.2174/157017941204150522185129>.
35. Seo D. Y., Lee S. R., Heo J.-W., No M.-H., Rhee B. D., Ko K. S., Kwak H.-B., Han J. Ursolic acid in health and disease. *The Korean Journal of Physiology & Pharmacology*. 2018. Vol. 22, No. 3. P. 235. <https://doi.org/10.4196/kjpp.2018.22.3.235>.
36. Shoaib M., Shehzad A., Omar M., Rakha A., Raza H., Sharif H. R., Shakeel A., Ansari A., Niazi S. Inulin: Properties, health benefits and food applications. *Carbohydrate Polymers*. 2016. Vol. 147. P. 444–454. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.020>.
37. Sofowora A., Ogunbodede E., Onayade A. The role and place of medicinal plants in the strategies for disease prevention. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines*. 2013. Vol. 10, No. 5. <https://doi.org/10.4314/ajtcam.v10i5.2>.
38. Soucy N. V. Acetophenone. *Encyclopedia of Toxicology*. 2014. P. 43–45. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-386454-3.01157-x>.
39. Spinozzi E., Ferrati M., Cappellacci L., Caselli A., Perinelli D. R., Bonacucina G., Maggi F., Strzemeski M., Petrelli R., Pavela R., Desneux N., Benelli G. *Carlina acaulis* L. (Asteraceae): biology, phytochemistry, and application as a promising source of effective green insecticides and acaricides. *Industrial Crops and Products*. 2023. Vol. 192. P. 116076. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116076>.
40. Strzemeski M., Wójciak-Kosior M., Sowa I., Rutkowska E., Szwerc W., Kocjan R., Latański M. *Carlina* species as a new source of bioactive pentacyclic triterpenes. *Industrial Crops and Products*. 2016. Vol. 94. P. 498–504. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.025>.
41. Strzemeski M., Wójciak-Kosior M., Sowa I., Załuski D., Verpoorte R. Historical and traditional medical applications of *Carlina acaulis* L. – A critical ethnopharmacological review. *Journal of Ethnopharmacology*. 2019. Vol. 239. P. 111842. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2019.111842>.
42. The IUCN Red List of Threatened Species. *IUCN Red List of Threatened Species*. URL: <https://www.iucnredlist.org/> (Last accessed: 10.08.2024).

43. Viet T. D., Xuan T. D., Anh L. H. α -Amyrin and β -Amyrin Isolated from *Celastrus hindsii* Leaves and Their Antioxidant, Anti-Xanthine Oxidase, and Anti-Tyrosinase Potentials. *Molecules*. 2021. T. 26, No 23. P. 7248. <https://doi.org/10.3390/molecules26237248>.
44. Vincken J.-P., Heng L., de Groot A., Gruppen H. Saponins, classification and occurrence in the plant kingdom. *Phytochemistry*. 2007. Vol. 68, No. 3. P. 275–297. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2006.10.008>.
45. Wnorowski A., Wnorowska S., Wojas-Krawczyk K., Grenda A., Staniak M., Michalak A., Woźniak S., Matosiuk D., Biała G., Wójciak M., Sowa I., Krawczyk P., Strzemiński M. Toxicity of *Carlina* Oxide–A Natural Polyacetylene from the *Carlina acaulis* Roots–In Vitro and in Vivo Study. *Toxins*. 2020. Vol. 12, No. 4. P. 239. <https://doi.org/10.3390/toxins12040239>.
46. Xiao L., Chen X.-J., Feng J.-K., Li W.-N., Yuan S., Hu Y. Natural products as the calcium channel blockers for the treatment of arrhythmia: Advance and prospect. *Fitoterapia*. 2023. P. 105600. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2023.105600>.
47. Zhang X., Gao Y., Zhou Y., Liu Z., Liu R. Pharmacological mechanism of natural drugs and their active ingredients in the treatment of arrhythmia via calcium channel regulation. *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2023. Vol. 160. P. 114413. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2023.114413>.

O. V. Soroka, M. Z. Prokopiak, L. R. Hrytsak, N. M. Drobyk

Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine

BIOLOGICALLY ACTIVE COMPOUNDS IN SPECIES OF *CARLINA* L. GENUS OF FLORA OF UKRAINE

The review analyzes literature on the biologically active compounds synthesized in the underground and aboveground parts of medicinal plants of the *Carlina* L. genus. Various phytochemicals have been identified in these species, including flavonoids, essential oils, terpenes and terpenoids, saponins, alkaloids, polysaccharides, tannins, resins, glycosides, ketones, polyacetylenes, and aldehydes.

According to modern research, the highest concentration of inulin polysaccharide (up to 12–22 %) has been found in the roots of *Carlina* plants. Inulin is an effective prebiotic widely used in medicine due to its ability to reduce glucose and low-density lipoprotein (LDL) levels, making it beneficial for treating diabetes, atherosclerosis, and obesity. Additionally, inulin exhibits anticoagulant, immunomodulatory, antitumor, and anti-inflammatory properties.

Essential oil (1–5 %) is extracted from the roots of *Carlina* plants using the hydrodistillation method. This oil contains a variety of terpene components, including β -sesquifellandrene, α -zingiberene, β -farnesene, α -curcumin, γ -curcumin, and β -bisabolene. These constituents are responsible for the antimicrobial, antifungal, anti-inflammatory, anti-ulcer, and antioxidant activities of the oil and also function as acetylcholinesterase inhibitors.

The roots and aerial parts of *Carlina* plants are also rich sources of chlorogenic acid (1.94 %), triterpene saponins, alkaloids, and flavonoids. Alkaloids are typically found in plants as salts of organic acids or in glycosidic form. In medical applications, plant materials containing these compounds are used for their anti-inflammatory, sedative, tonic, and diuretic properties.

Flavonoids, one of the most abundant groups of phenolic compounds in the aboveground organs of *Carlina* plants, exhibit potent antimicrobial activity against a broad range of microorganisms. The predominant flavonoids found in the leaves include glycoside flavones such as orientin, homoorientin, and vitexin, which possess antioxidant, antiviral, antibacterial, and analgesic properties. Additionally, the leaves contain apigenin, a biologically active compound that interacts with molecular targets in the body, exerting anti-inflammatory, antioxidant, and neuroprotective effects.

Carlina plants serve as the basis for various herbal medicines, including diuretic, anthelmintic, sedative, expectorant, anti-inflammatory, analgesic, diaphoretic, antihemorrhoidal, and antimicrobial formulations. Phytopreparations derived from *Carlina* plants are used to treat digestive disorders and are also applied topically to manage skin infections and purulent rashes.

Key words: species of *Carlina* L. genus, biologically active compounds, inulin, essential oil, triterpenes, terpenoids, saponins, flavonoids, xanthones.

Надійшла 4.11.2024.

ІСТОРІЯ НАУКИ. ПЕРСОНАЛІЇ

УДК 58(477.46-21) Вакар

doi: 10.25128/2078-2357.24.3–4.11

Т. В. МАМЧУР, М. І. ПАРУБОК, М. М. ФІТКАЛЕНКО

Уманський національний університет садівництва

вул. Інститутська, 1, м. Умань, Черкаська область, 20301

e-mail: mamchur-tv@ukr.net, m.parubok69@gmail.com, marifigol1957@gmail.com

ПАМ'ЯТІ УМАНСЬКОГО БОТАНІКА ВАКАР ТЕТЯНИ БОРИСІВНИ (01.11.1943–10.05.2010)



У статті за архівними матеріалами наведено біографічні дані уманського ботаніка, кандидата сільськогосподарських наук, доцента, завідувача кафедри ботаніки Уманського сільськогосподарського інституту (нині Уманський національний університет садівництва) Тетяни Борисівни Вакар (01.11.1943–10.05.2010 рр.).

Висвітлено життєвий, науковий і педагогічний шлях Т. Б. Вакар, яка зробила вагомий внесок у розвиток наукової та навчальної роботи кафедри ботаніки. Сфера наукових інтересів – ботаніка.

Любов до рослин ще з дитинства її прививав батько – доктор біологічних наук, професор Борис Анатолійович Вакар. Він пов'язав своє життя з наукою ботанікою, обіймав посаду завідувача кафедри та передавав свій досвід доньці, яка пройшла шлях від асистента до доцента, працюючи з ним у сільськогосподарських інститутах. Вона зростала як педагог, науковець, а практична діяльність збагатила багаж знань у вивченні флори, які передавала своїм студентам.

Численні переїзди родини сприяли ознайомленню з флорою різних місцевостей, що примножило фаховий рівень науковиці. Дендрологічний склад дендропарку «Софіївка», який розташований поруч з Уманським сільськогосподарським інститутом, її вабив та надихав.

Основною діяльністю Т. Б. Вакар була педагогічна діяльність, яка її повністю поглинала. Лекції, лабораторні заняття, польові практики доцента відзначалися високофаховою науковою й викладацькою майстерністю. Упродовж багатьох років разом із студентами вона здійснювала ботанічні екскурсії, вивчала місцеву флору. Свої наукові здобутки дослідниця висвітлювала у наукових працях.

За спогадами колег та студентів, Тетяна Борисівна була висококваліфікованим ботаніком, чуйним викладачем, завжди була віддана своїй справі. Уміння та навички теоретичного і практичного матеріалу вона пов'язувала із сільськогосподарським виробництвом, постійно підвищувала свій фаховий рівень.

Наукова-педагогічна діяльність Тетяни Борисівни в Умані на посаді завідувача кафедри ботаніки дозволила зміцнити матеріально-технічну базу, поповнити колекції рослин ботанічного розсадника та гербарію (UM), які нині продовжують свою діяльність і є науково-навчальною спадщиною університету. Вона завжди була толерантна, дисциплінована, вимоглива до себе і своїх колег, користувалася авторитетом.

Ключові слова: Т. Б. Вакар, науковець, викладач, завідувачка, ботанік.

10 травня 2010 року на 96 році життя пішла у засвіти уманський ботанік Тетяна Борисівна Вакар, кандидат біологічних наук, доцент, завідувач кафедри ботаніки Уманського сільськогосподарського інституту. До кінця життя вона була віддана своїй улюбленій справі – ботаніці.

Народилася Тетяна Борисівна 1 листопада 1914 р. у селі Велика Липовиця Тамбовської області у сім'ї службовців. У 1924 р. з родиною переїхала до міста Омськ. Відмінне завершення навчання у школі 1931 р. сприяло вступу до Томського державного університету на біологічний факультет. У 1937 р. після закінчення навчання отримала диплом з відзнакою та вступила до аспірантури за спеціальністю «Фізіологія і хімія рослин». Саме її батько, Борис Анатолійович Вакар, доктор біологічних наук, професор, науковець у галузі ботаніки, привив доньці любов до науки ботаніки. У зв'язку з його роботою у Ленінградському сільськогосподарському інституті, родина була змушена у 1938 р. переїхати. Тетяна Борисівна до 1941 р. працювала на посаді мікробіолога на вітамінному заводі, але згодом його було евакуйовано. Далі вона почала працювати разом з батьком в інституті на посаді старшого лаборанта, асистента кафедри ботаніки. У важкі роки війни 1942 р. інститут і працівники були евакуйовані до Пермського сільськогосподарського інституту. До міста Тетяна Борисівна разом із родиною повернулася лише після його звільнення у 1944 р.

У 1945 р. стан здоров'я батька Тетяни Борисівни погіршився і лікарі порадили переїхати до міста Горки (Білорусія), де вони обоє влаштувалися на кафедру ботаніки Білоруського сільськогосподарського інституту. У навчальному закладі вона продовжила свою науково-педагогічну діяльність на кафедрі спочатку асистентом, згодом старшим викладачем. На базі навчального закладу Тетяна Борисівна захистила кандидатську дисертацію й здобула науковий ступінь кандидата сільськогосподарських наук. На той час вона читала курс ботаніки на зоотехнічному факультеті і там доля звела її із майбутнім чоловіком – Кавцевичем Сергієм Миколайовичем. У 1949 р. подружжя вимушено переїздить до міста Новочеркаськ Ростовської області. Педагогічну діяльність Тетяна Борисівна продовжила у Новочеркаському зооветеринарному інституті, її було обрано за конкурсом на посаду в. о. доцента кафедри ботаніки

(1949–1950 рр.). Вона читала лекції, проводила лабораторно-практичні заняття, навчальну практику, прививаючи любов до рослин студентам зоотехнічного та ветеринарного факультетів.

З вересня 1950 р. Т. Б. Вакар здійснила переїзд в місто Умань Черкаської області. Науково-педагогічну діяльність Тетяна Борисівна до останніх років свого життя провадила в Уманському сільськогосподарському інституті спочатку на посаді асистента, згодом доцента (з 1951 р.) та завідувачки кафедри ботаніки (з вересня 1962 р.). У перші дні перебування в Умані, за спогадами її доньки Наталії, Тетяна Борисівна відвідала дендропарк «Софіївка» (нині Національний дендрологічний парк «Софіївка» НАН України) для ознайомлення з місцевою флорою.

Т. Б. Вакар у спогадах студентів згадується як висококваліфікований ботанік, чуйний викладач, віддана своїй справі. Подання нею теоретичного і практичного матеріалу завжди було пов'язано із сільськогосподарським виробництвом.

Перебуваючи на посаді завідувача кафедри ботаніки, у 1962–1979 рр., Тетяна Борисівна внесла вагомий вклад у розвиток її наукової та навчальної роботи. Матеріально-технічна база стала однією із перших в інституті, де було здійснено розробку методик програмного вивчення курсу ботаніки та ведення аудиторного заняття із застосуванням технічних засобів і програмного забезпечення. Цьому вона завдячує своєму чоловікові, викладачу кафедри механізації, який допоміг розробити механізовані планшети з метою безмашинного контролю знань. Вони були змонтовані з двох електроцифрових тренажерів: один зі змінною програмою, а другий – великий тренажер з систематики квіткових рослин.

Тетяна Борисівна була толерантна, дисциплінована, вимоглива до себе і своїх колег, користувалася авторитетом серед них і студентів, завжди підвищувала свій фаховий рівень.

Завдяки чуйному контролю Тетяни Борисівни були збережені історичні колекції гербарію Уманського національного університету садівництва (УМ). Необхідно зазначити, що поповнення фондів гербарними зборами було здійснено разом зі студентами під час експедиційних маршрутів у процесі вивчення флори Умані, професійно їх визначено та оформлено.

Наукова робота Т. Б. Вакар була пов'язана з криптологією, учена досліджувала мейоз диплоїдних і поліплоїдних форм зернових злаків; вивчала бур'яни польових культур у співпраці з кафедрою агрохімії і ґрунтознавства, а в останні роки – проблеми вищої школи за темою: «Використання технічних засобів і наочних матеріалів у навчальному процесі». Результати досліджень було висвітлено у наукових працях, методичних рекомендаціях.

Під її керівництвом доглядали та поповнювали новими рослинами й колекційний ботанічний розсадник, де викладачі та студенти проводили науково-дослідну роботу, описували фенологічні спостереження, збирали гербарні зразки, оприлюднювали у дипломних роботах.

Куратор ботанічного розсадника М. І. Парубок і куратор гербарію (УМ) Т. В. Мамчур продовжують підтримувати роботу Т. Б. Вакар з утримування колекцій, які кожного року поповнюються й слугують пам'яттю про вчену-ботаніка.

Студенти Т. Б. Вакар стали відомими науковцями, доцентами та професорами, які й донині працюють у початковому закладі та теплими словами згадують її як порядну, виховану, толерантну, інтелігентну особистість. Вона прививала їм знання та любов до рослин.

Уманський національний університет садівництва підтримує історичну традицію ведення календарних пам'ятних дат, приурочених до дня народження науково-педагогічних працівників ЗВО, висвітлює їх вклад у розвиток науки та навчального закладу. Для проведення конференцій, круглих столів залучають студентів. У 2024 році Тетяні Борисівні виповнилося б 110 років. Тому з нагоди 180-річчя навчального закладу колектив кафедри біології та бібліотеки університету провели круглий стіл «У серцях вихованців назавжди» у рамках проекту «Імена великих і незнаних», який був приурочений роковинам Тетяни Борисівни Вакар. Запрошені її учні та студенти першокурсники, які вивчають дисципліну ботаніку, пізнали історичну спадщину навчального закладу та внесок відомого науковця-ботаніка.

Похована Т. Б. Вакар на кладовищі «Софіївська Слобідка» міста Умані. Світла пам'ять про неї завжди буде у наших серцях.

1. Біля витоків ботанічного розсадника Уманського національного університету садівництва : монографія / авт.-упоряд. Т. В. Мамчур, Г. А. Чорна, М. І. Парубок, О. В. Свистун, Н. В. Михайлова; за ред. д-ра с.-г. наук В. П. Карпенка. Умань : Видавець Сочінський М. М., 2023. 447 с.
2. Мамчур Т. В., Карпенко В. П., Парубок М. І., Свистун О. В. Вчені-ботаніки Уманського національного університету садівництва та їх наукові дослідження (1844–2016) : монографія (присвячується 95-річчю створення кафедри ботаніки) [за ред. В. П. Карпенка]. Умань : ВПЦ «Візаві», 2017. 280 с., іл.
3. Мамчур Т. В., Парубок М. І., Свистун О. В. Пам'яті Тетяни Борисівни Вакар (до 100-річчя від дня народження). *Перспективи розвитку лісового і садово-паркового господарства: Четверті Анненківські читання* (м. Умань, 3–4 жовтня 2019). Умань : Видавець Сочінський М. М., 2019. С. 180–184.

References

1. Bilia vytokiv botanichnoho rozsadnyka Umanskooho natsionalnoho universytetu sadivnytstva : monohrafiia / avt.-uporiad. T. V. Mamchur, H. A. Chorna, M. I. Parubok, O. V. Svystun, N. V. Mykhailova; za red. d-ra s.-h. nauk V. P. Karpenka. Uman : Vydavets Sochinskyi M. M., 2023. 447 s. [in Ukrainian]
2. Mamchur T. V., Karpenko V. P., Parubok M. I., Svystun O. V. Vcheni-botaniky Umanskooho natsionalnoho universytetu sadivnytstva ta yikh naukovy doslidzhennia (1844–2016): monohrafiia (prysviachuetsia 95-richchiu stvorennia kafedry botaniky) [za red. V. P. Karpenka]. Uman : VPTs «Vizavi», 2017. 280 s., il. [in Ukrainian]
3. Mamchur T. V., Parubok M. I., Svystun O. V. Pamiati Tetiany Borysivny Vakar (do 100-richchia vid dnia narodzhennia). *Perspektyvy rozvytku lisovoho i sadovo-parkovoho hospodarstva : Chetverti Annenkovski chytannia* (m. Uman, 3–4 zhovtnia 2019). Uman : Vydavets Sochinskyi M. M., 2019. С. 180–184. [in Ukrainian]

T. V. Mamchur, M. I. Parubok, M. M. Fitkalenko

Uman National University of Horticulture, Ukraine

IN MEMORY OF UMAN BOTANIST VAKAR TETYANA BORYSIVNA (01.11.1943–10.05.2010)

The article, based on archival materials, presents the biographical profile of Tetiana Borysivna Vakar (01.11.1943–10.05.2010), a prominent botanist from Uman, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, and Head of the Department of Botany at the Uman Agricultural Institute (now Uman National University of Horticulture).

The article explores the life, scientific contributions, and teaching career of T. B. Vakar, who played a pivotal role in the advancement of scientific research and education within the Department of Botany. Her primary research interests lay in botany.

T. B. Vakar's passion for plants was nurtured from childhood by her father, Professor Borys Anatoliiovych Vakar, a Doctor of Biological Sciences and a leading figure in botany. As the head of a botanical department, he mentored his daughter, who progressed from assistant to associate professor, working alongside him in various agricultural institutes. Over the years, she developed as both a teacher and a scientist, enriching her practical and theoretical knowledge of flora and passing it on to her students.

Her family's extensive travels exposed her to diverse floral ecosystems, enhancing her scientific expertise in plant identification and taxonomy. This exposure further refined her research skills. Eventually, Ukraine became the final destination of her professional journey. The rich botanical diversity of Uman, its surroundings, and the remarkable dendrological collections of the Sofiiivka Arboretum, adjacent to the Uman Agricultural Institute, profoundly influenced and inspired her work. Teaching remained the cornerstone of T. B. Vakar's career. Her lectures, laboratory classes, and field practices were distinguished by scientific rigor and pedagogical excellence. For years, she conducted botanical excursions with her students, actively engaging them in the study of local flora. She documented her research findings in numerous scientific publications.

According to colleagues and students, Tetiana Borysivna was recognized as a highly skilled botanist, a dedicated educator, and a committed researcher. She consistently integrated theoretical knowledge with practical applications in agricultural production while continuously enhancing her professional expertise.

As head of the Department of Botany, she significantly contributed to strengthening the department's infrastructure, enriching the plant collections of the Botanical Nursery and Herbarium (UM). These collections, now part of the university's scientific and educational legacy, continue to serve as valuable resources for research and learning.

Tetiana Borysivna was widely respected for her professionalism, discipline, and high standards. She maintained tolerance and fairness, holding both herself and her colleagues to exacting standards. Her dedication to botany and education left a lasting impact on the academic and scientific community of Uman.

Key words: T. B. Vakar, scholar, teacher, head of the department, botanist.

Надійшла 28.10.2024.



**TERNOPIL VOLODYMYR HNATIUK
NATIONAL PEDAGOGICAL UNIVERSITY**

Підписано до друку 27.12.2024. Формат 60 x 84/18. Папір друкарський.
Умовних друківаних аркушів – 12,1. Обліково-видавничих аркушів – 8,5. Замовлення № 16
Наклад 300 прим.

Віддруковано у видавничому центрі «Вектор»
46018, м. Тернопіль, вул. Львівська, 12. Тел.: (0352) 40-18-12

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
серія ТР № 46 від 07 березня 2013р.
ФО Осадца Ю.В.

Signed for printing 27.12.2024. Format 60 x 84/18. Printing paper.
Number of conventional printing sheets – 12.1. Number of accounted and published pages – 8.5. Order № 16.
Edition 300 copies. Published in the publishing centre “Vector”
46018, Ternopil, st. Lvivska, 12. Phone: (0352) 40-18-12

Certificate of enlisting the subject of publishing in the State Register of publishers,
manufactures and distributors of publishing products
Series TP № 46 from 07 March 2013
Name and surname Osadtsa Yu. V.