

Міністерство освіти і науки України
Житомирський державний університет імені Івана Франка

Український журнал природничих наук

№ 8

Науковий журнал,
заснований у 2022 році



Видавничий дім
«Гельветика»
2024

*Видається за рішенням вченої ради Житомирського державного університету імені Івана Франка
(протокол № 11 від 25.06.2024 року).*

Головний редактор

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

Заступник головного редактора

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

Відповідальний секретар

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

Члени редакційної колегії

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

Балашова Галина – доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу біотехнології, овочевих культур та картоплі, Інститут зрошуваного землеробства НААН України (Херсон, Україна)

Біляєва Ірина – доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу маркетингу, трансферу інновацій та економічних досліджень Інституту зрошуваного землеробства НААН України (Херсон, Україна)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Малярчук Микола – доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник відділу зрошуваного землеробства Інституту зрошуваного землеробства НААН України (Херсон, Україна)

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

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

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

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

Пілярська Олена – кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник відділу інноваційної діяльності, трансферу технологій та інтелектуальної власності, Інститут зрошуваного землеробства НААН України (Херсон, Україна)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Наукове періодичне видання

Український журнал природничих наук: науковий журнал / [гол. ред. Овчаренко Микола,
відп. ред. Шелюк Юлія]. Житомир: 2024. № 8. 302 с.

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

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

Спеціальності: 091 Біологія, 101 Екологія, 102 Хімія, 106 Географія, 201 Агрономія;
(галузі науки: біологічні, хімічні, географічні, сільськогосподарські)

Сайт видання: naturaljournal.zu.edu.ua/index.php/ujns
Макетування: Кузнецова Н. С.

В усіх статтях збережено орфографію та пунктуацію авторів.

Підписано до друку 26.06.2024 р. Формат 60x90/8. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 37,75. Тираж 300. Замовлення 0724/524

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

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

© Житомирський державний університет імені Івана Франка, 2024

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

Ukrainian Journal of Natural Sciences

№ 8

Scientific journal,
founded in 2022



Publishing House
"Helvetica"
2024

*Approved for publication by the Academic Council of Zhytomyr Ivan Franko State University
(protocol № 11 dated from 25.06.2024).*

Editor-in-chief

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

Co-editor-in-chief

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

Executive Secretary

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

Members of the Editorial Board

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

Balashova Halyna – Doctor of Sciences (Agricultural), Senior Researcher, Head of Biotechnology, Vegetables and Potatoes Department of Institute of Irrigated Agriculture NAAS of Ukraine (Kherson, Ukraine)

Biliaieva Iryna – Doctor of Sciences (Agricultural), Senior Researcher, Head of the Department of Marketing, Innovation Transfer and Economic Research of Institute of Irrigated Agriculture NAAS of Ukraine (Kherson, Ukraine)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Maliarchuk Mykola – Doctor of Sciences (Agricultural), Senior Researcher of Institute of Irrigated Agriculture NAAS of Ukraine (Kherson, Ukraine)

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

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

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

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

Piliarska Olena – PhD (Agricultural), Senior Researcher, Head of the Department of Marketing, Innovation Transfer and Economic Research of Institute of Irrigated Agriculture NAAS of Ukraine (Kherson, Ukraine)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Scientific Periodical

Ukrainian Journal of Natural Sciences / [editor Ovcharenko Mykola, co-editor-in-chief Sheliuk Yuliia].
Zhytomyr: 2024. № 8. 302 p.

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

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

Specialties: 091 Biology, 101 Ecology, 102 Chemistry, 106 Geography, 201 Agronomy;
(fields of science: biological, chemical, geographical, agricultural)

Website: naturaljournal.zu.edu.ua/index.php/ujns
Modelling: Kuznietsova N. S.

Authors' spelling and punctuation are preserved in the articles.

Signed for printing 26.06.2024. Size 60x90/8. Offset Paper. Font Times New Roman
Risograph printing. Conventional printed sheets 37,75. Number of copies 300. Order 0724/524

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

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

© Zhytomyr Ivan Franko State University, 2024



БІОЛОГІЯ

UDC 581.6:615.8:582.23

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.1>

ANTIMICROBIAL POTENTIAL OF BARK EXTRACTS OF THE GENUS SORBUS PLANTS

N. O. Khromykh¹, T. V. Sklyar², O. V. Liashenko³

The spread of antibiotic resistance of pathogenic microorganisms poses a serious threat to human health and actualizes the search for new antimicrobial agents of natural origin. Plants of the genus Sorbus L. are known in ethnopharmacology, including their antimicrobial ability. The aim of the work was to establish the spectrum of antibacterial and antifungal activity of bark extracts of Sorbus species and natural hybrids. Ethanol extracts of plant bark, obtained by the method of cold maceration, were tested at a concentration of 30 µg/µL. The antimicrobial activity of the extracts was studied by the disc-diffusion method and evaluated by the size of the inhibition zone of the colony's growth of microorganisms in comparison with reference antibiotics. It was found that the activity of bark extracts of S. aucuparia and S. torminalis was the greatest against Pseudomonas aeruginosa B907 strain (respectively, 63.5% and 53.8% of the ofloxacin level). The greatest inhibition of the growth of Staphylococcus aureus B904 was achieved by the bark extracts of S. hybrida (66.2%) and S. latifolia (60.8%). The growth of the ofloxacin-resistant Proteus mirabilis clinical strain was most inhibited by the bark extracts of S. domestica (inhibition zone diameter 13.5 mm) and S. hybrida (11.9 mm). Against ofloxacin-resistant clinical strain St. epidermidis the most effective were the bark extracts of S. torminalis (inhibition zone 13.8 mm) and S. latifolia (13.5 mm). Clinical fungal strains were resistant to fluconazole but sensitive to bark extracts, most notably Candida albicans to S. domestica (inhibition zone 15.9 mm) and S. hybrida (14.2 mm) extracts, and C. krusei strain to S. aucuparia extract (14.1 mm). Thus, bark extracts of Sorbus plant showed remarkable activity against both Gram-negative and Gram-positive collection bacterial cultures, as well as against clinical antibiotic-resistant bacterial and fungal strains. The obtained results confirm the high antimicrobial potential of Sorbus plant bark extracts and the possibility of their use for the creation of effective antimicrobial agents.

Key words: antibiotic-resistant microorganisms, Sorbus plant extract, antimicrobial activity.

¹ PhD in Biology, Senior Researcher of Biology Research Institute
(Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro)

e-mail: Khromykh2012@gmail.com

ORCID: 0000-0003-3543-352X

² PhD in Biology, Professor Assistant,
Head of Microbiology, Virology and Biotechnology Department
(Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro)

e-mail: microviro@ukr.net

ORCID: 0000-0003-0224-2460

³ Postgraduate Student
(Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro)

e-mail: Liashenkoalena579@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0433-8677

АНТИМІКРОБНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ЕКСТРАКТІВ КОРИ РОСЛИН РОДУ *SORBUS*

Н. О. Хромих, Т. В. Скляр, О. В. Лященко

Поширення антибіотикорезистентності патогенних мікроорганізмів створює серйозну загрозу для охорони здоров'я людини та актуалізує пошук нових антимікробних агентів природного походження. Рослини роду *Sorbus* L. відомі в етнофармакології, у тому числі протимікробною здатністю. Метою роботи було встановлення спектру антибактеріальної та протигрибкової активності екстрактів кори видів і природних гібридів *Sorbus*. Етанолові екстракти кори рослин, отримані методом холодної мацерації, тестували в концентрації 30 мкг/мкл. Антимікробну активність екстрактів вивчали диск-дифузним методом і оцінювали за розміром зони інгібування росту колоній мікроорганізмів у порівнянні з референтними антибіотиками. Встановлено, що активність екстрактів кори *S. aucuparia* і *S. torminalis* проти штаму *Pseudomonas aeruginosa* B907 була найбільшою (відповідно, 63,5% і 53,8% від рівня офлоксацину). Найбільшого інгібування росту *Staphylococcus aureus* B904 досягли екстракти кори *S. hybrida* (66,2%) і *S. latifolia* (60,8%). Піст клінічного штаму *Proteus mirabilis*, стійкого до офлоксацину, найбільше пригнічували екстракти кори *S. domestica* (діаметр зони інгібування 13,5 мм) та *S. hybrida* (11,9 мм). Проти стійкого до офлоксацину клінічного штаму *St. epidermidis* найбільш ефективними були екстракти кори *S. torminalis* (діаметр зони 13,8 мм) і *S. latifolia* (13,5 мм). Клінічні грибові штами були стійкими до флуконазолу, але чутливими до рослинних екстрактів, найбільше шам *Candida albicans* до екстракту *S. domestica* (діаметр зони 15,9 мм) і *S. hybrida* (14,2 мм) та шам *C. krusei* до екстракту *S. aucuparia* (14,1 мм). Отже, екстракти кори рослин *Sorbus* виявили активність як проти грам-негативних, так і грам-позитивних колекційних бактеріальних культур, а також проти клінічних стійких до антибіотиків бактеріальних і грибових штамів. Отримані результати підтверджують високий антимікробний потенціал екстрактів кори рослин *Sorbus* і потенційну можливість їх застосування для створення ефективних протимікробних засобів.

Ключові слова: антибіотикорезистентні мікроорганізми, екстракти рослин *Sorbus*, антимікробна активність.

Introduction

The resistance of pathogenic microorganisms to many, most, or all antibiotics available for clinical use, which has become a global problem in recent decades, is a consequence of the excessive and often inappropriate use of drugs (Cook & Wright, 2022). The continuous spread of pathogenic microbial strains resistance to traditional medicines poses a serious threat to human health and food safety, which necessitates the search for new effective antimicrobial agents, including substances of natural origin (Walesch et al., 2023). In this sense, plants are recognized as a promising source of antimicrobial substances with a huge therapeutic potential, since phytochemicals are completely different from traditional antibiotics in terms of chemical structure, mechanisms of action and target sites, which reduces the risk of resistance (Wiart et al., 2023). The most common mechanisms of antimicrobial action of phytochemicals established today include disruption of the functionality of microorganism's cell membranes, inhibition of efflux pumps and inhibition of microbial enzymes (Khameneh et al., 2019). In recent years, the antibacte-

rial and antifungal activity of many mixtures (extracts, essential oils) and individual plant compounds against drug-resistant pathogens has been documented (Kokoska et al., 2019). In addition, the ability of plant extracts and isolated phytochemicals to additive or synergistic interaction with traditional antibiotics was revealed (Walesch et al., 2023), which can contribute to the preservation or enhancement of the activity of antimicrobial drugs.

Plants of the genus *Sorbus* L. (Rosaceae) are widespread in temperate regions, in particular, in Ukraine *S. aucuparia*, *S. domestica* and *S. torminalis* grow naturally, and the species *S. aria* and some hybrids were introduced (Fedoronchuk, 2017). *Sorbus* plants are well known in the ethnopharmacology of Europe and the world (Kültür, 2007; Sołtys et al., 2020), and the plant fruits are included in the pharmacopoeia as multivitamin components (Arvinte et al., 2023). Preparations from *Sorbus* plants were used in folk medicine as remedies for bacterial and viral diseases (Sarv et al., 2020). The bark of *S. decora* and *S. americana* plants was used by aboriginal peoples of Canada to treat diabetes (Bailie et al., 2016). A decoction of *S. aucuparia* bark was used in

Estonia for the treatment of cancer diseases (Sak et al., 2014), and in Lithuania as a means for washing wounds (Pranskuniene et al., 2019).

Scientific studies of the antimicrobial activity of the genus *Sorbus* L. plants are currently fragmentary and insufficient for general conclusions. According to Boncler et al. (2017), fruit extracts of *S. aucuparia* showed high activity only against Gram-negative bacteria, while Bobinaitė et al. (2020) reported the antimicrobial activity of rowanberry pomace extracts, especially against Gram-positive bacteria. Leaf extracts of *S. aucuparia* and *S. caucasica* var *yaltirikii* had a strong activity against Gram-negative bacteria (Turumtay et al., 2017). *S. umbellata* leaf extracts showed high activity against both Gram-positive (inhibition zone of the *St. aureus* reached 19.3 mm) and Gram-negative bacteria (Kavak & Akdeniz, 2019). The antimicrobial activity of the bark of *Sorbus* plants remains understudied at present. The aim of the work was to find out the spectrum and level of antimicrobial activity of bark ethanol extracts of the genus *Sorbus* L. plants and to evaluate the prospects of this natural resource.

Material and methods

Selection of plant material. We studied the bark of the genus *Sorbus* L. plants from the collection of Botanical Garden of Oles Honchar Dnipro National University: natural for Ukraine species *S. domestica* L., *S. aucuparia* L., and *S. torminalis* (L.) Crantz and introduced *S. aria* (L.) Crantz., *S. latifolia* (Lam.) Pers., and *S. hybrida* L. Bark samples were collected from one-year plant shoots, dried and crushed, and extracts were prepared by maceration in 70% ethanol (1:10, w/v) for 24 hours at room temperature. The filtered extracts were dried using a rotary evaporator and stored at 4 °C, before preparing extracts with a concentration of 30 µg/µl for analysis.

Antimicrobial activity assay. The antibacterial and antifungal activity of *Sorbus* bark extracts was studied by the disk diffusion method (EUCAST..., 2015). For this, Petri dishes containing Mueller-Hinton agar were seeded with 10⁹ cfu (colony forming units) suspension of test microbial cultures. Sterile paper discs (6 mm diameter) were impregnated with 10 µL of bark extracts and placed on the agar surface, after which the plates were incubated at 37 °C for 24 h. Both collection (*Pseudomonas aeruginosa* B907, *Escherichia coli* B906, *Klebsiella pneumoniae* B920, *Staphylococcus aureus* B209 and *St. aureus*

B904) and clinical bacterial strains (*Proteus mirabilis* and two *St. epidermidis* strains from different sources), and fungal clinical *Candida albicans* and *C. krusei* strains were tested in the study. The antibiotics ofloxacin (5.0 µg per disc) against bacteria and fluconazole (25.0 µg per disc) against fungi served as a positive control. Antimicrobial activity of the bark ethanol extracts was expressed as the inhibition zone diameter (mm) around the discs along with disc diameter.

Statistical processing. The studies were performed at least in triplicate, the results were processed using the Microsoft Excel XP 2007 software package and are presented as mean ± standard deviation ($\bar{x} \pm SD$). Differences in mean values, assessed by the Tukey test in the Statgraphics Centurion XV Version 15.1.02 program package, were considered statistically significant at $P < 0.05$.

Results

Ethanol bark extracts of *Sorbus* plants at concentration 30 µg/µl showed antimicrobial activity against both Gram-negative and Gram-positive bacteria, as well as against fungal strains (Fig. 1).

The level of antibacterial activity of bark extracts against collection Gram-negative strains varied within 30.3–63.5% of the effectiveness of ofloxacin (Table 1).

The bark extract of *S. domestica* most actively inhibited the colony growth of *K. pneumoniae* and *E. coli* (48.9% and 55.6% of the ofloxacin effectiveness, respectively), as well as the ofloxacin-insensitive clinical strain *P. mirabilis*. The activity of *S. aucuparia* of bark extract was the highest against *P. aeruginosa* (63.5% of the ofloxacin effectiveness). The activity of *S. torminalis* bark extract was most notable against *P. aeruginosa* and *K. pneumoniae* (53.8% and 48.6% of the ofloxacin effectiveness). Bark extracts of other *Sorbus* species had less pronounced activity against Gram-negative bacteria.

The activity of bark extracts of *Sorbus* plants against Gram-positive collection strains varied within 36.5 – 66.2% of the effectiveness of ofloxacin (Table 2).

The greatest inhibition of the growth of colonies of *St. aureus* B904 achieved the bark extracts of *S. hybrida* (66.2% of the ofloxacin effectiveness) and *S. latifolia* (60.8%). The bark extract of *S. aucuparia* showed the highest activity against *St. aureus* B209 (52.8% of the ofloxacin effectiveness). The growth of insensitive to ofloxacin clinical strains of *St. epidermidis*-1 and *St. epidermidis*-2 were

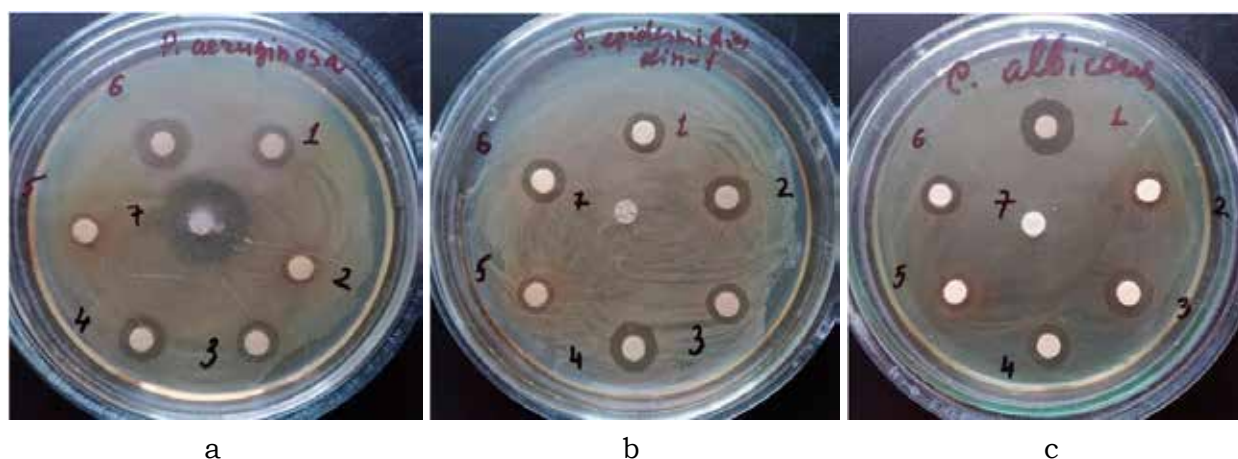


Fig. 1. Spectrum of antimicrobial activity of the bark extracts of *Sorbus* L. plants:
1 – *S. domestica*, 2 – *S. latifolia*, 3 – *S. hybrida*, 4 – *S. torminalis*, 5 – *S. aria*,
6 – *S. aucuparia*, 7 – antibiotic;
a – *P. aeruginosa* B907, b – *St. epidermidis*-1, c – *C. albicans*.

Table 1
The activity of *Sorbus* bark extracts against Gram-negative bacteria (n = 3, x ± SD)

Plant species	Inhibition zone diameter (mm)			
	<i>P. mirabilis</i> (clinical)	<i>P. aeruginosa</i> B907	<i>K. pneumoniae</i> B920	<i>E. coli</i> B906
<i>S. domestica</i>	13,54 ± 0,34 ^d	11,89 ± 0,04 ^b	13,92 ± 0,42 ^c	13,54 ± 0,20 ^b
<i>S. latifolia</i>	9,82 ± 0,12 ^a	9,16 ± 0,19 ^a	11,02 ± 0,33 ^b	13,18 ± 0,12 ^b
<i>S. hybrida</i>	11,90 ± 0,09 ^c	11,48 ± 0,28 ^b	13,20 ± 0,32 ^c	13,27 ± 0,18 ^b
<i>S. torminalis</i>	10,84 ± 0,16 ^b	12,71 ± 0,62 ^b	13,85 ± 0,16 ^c	11,86 ± 0,15 ^a
<i>S. aria</i>	10,38 ± 0,34 ^{ab}	9,65 ± 0,34 ^a	8,63 ± 0,03 ^a	11,10 ± 0,31 ^a
<i>S. aucuparia</i>	9,99 ± 0,15 ^a	15,01 ± 0,86 ^c	9,14 ± 0,12 ^a	11,12 ± 0,54 ^a
Ofloxacin	NA	23,63 ± 0,63 ^d	28,49 ± 0,76 ^d	24,33 ± 0,73 ^c

Note. Different letters in a column indicate statistically significant differences in mean values according to the Tukey test ($P < 0.05$). NA – no activity.

Table 2
The activity of *Sorbus* bark extracts against Gram-positive bacteria (n = 3, x ± SD)

Plant species	Inhibition zone diameter (mm)			
	<i>St. aureus</i> B904	<i>St. aureus</i> B209	<i>St. epidermidis</i> (clinical-1)	<i>St. epidermidis</i> (clinical-2)
<i>S. domestica</i>	11,02 ± 0,17 ^a	11,15 ± 0,34 ^{bc}	11,72 ± 0,16 ^b	9,33 ± 0,18 ^a
<i>S. latifolia</i>	12,82 ± 0,12 ^{ab}	11,01 ± 0,26 ^{bc}	13,47 ± 0,61 ^d	11,36 ± 0,41 ^c
<i>S. hybrida</i>	13,97 ± 0,69 ^b	11,64 ± 0,26 ^{cd}	11,95 ± 0,35 ^{bc}	11,69 ± 0,37 ^c
<i>S. torminalis</i>	11,71 ± 0,20 ^a	8,54 ± 0,09 ^a	13,83 ± 0,06 ^d	12,15 ± 0,20 ^c
<i>S. aria</i>	11,64 ± 0,38 ^a	10,53 ± 0,39 ^b	10,37 ± 0,37 ^a	13,97 ± 0,16 ^d
<i>S. aucuparia</i>	11,58 ± 0,10 ^a	12,35 ± 0,35 ^d	12,55 ± 0,30 ^{cd}	10,36 ± 0,42 ^b
Ofloxacin	21,10 ± 1,65 ^c	23,41 ± 0,45 ^e	NA	NA

Note. Different letters in a column indicate statistically significant differences in mean values according to the Tukey test ($P < 0.05$). NA – no activity.

most effectively inhibited, respectively, by bark extracts of *S. torminalis*, *S. latifolia*, *S. aucuparia* plants, and *S. aria*, *S. torminalis* plants.

The inhibitory activity of *Sorbus* bark extracts against *Candida* clinical strains was detected in the absence of the antifungal effect of fluconazole (Table 3).

Table 3

The activity of *Sorbus* bark extracts against clinical fungal strains (n = 3, x ± SD)

Plant species	Inhibition zone diameter (mm)	
	<i>C. albicans</i>	<i>C. krusei</i>
<i>S. domestica</i>	15,85 ± 0,27 ^e	11,46 ± 0,07 ^{ab}
<i>S. latifolia</i>	11,33 ± 0,40 ^b	12,30 ± 0,40 ^b
<i>S. hybrida</i>	14,18 ± 0,12 ^d	11,77 ± 0,23 ^{ab}
<i>S. torminalis</i>	12,22 ± 0,23 ^c	11,36 ± 0,18 ^{ab}
<i>S. aria</i>	9,74 ± 0,32 ^a	10,81 ± 0,33 ^a
<i>S. aucuparia</i>	11,74 ± 0,18 ^{bc}	14,15 ± 0,78 ^c
Fluconazole	NA	NA

Note. Different letters in a column indicate statistically significant differences in mean values according to the Tukey test ($P < 0.05$). NA – no activity.

Bark extracts of *S. domestica* and *S. hybrida* plants showed the greatest ability to inhibit the growth of *C. albicans* colonies, while bark extracts of *S. aucuparia* and *S. latifolia* plants had the greatest efficacy against *C. krusei*.

Discussion

The study results testify to a wide spectrum of antimicrobial activity of bark extracts of the *Sorbus* plants in general and to species-specific features of plant extracts interaction with certain pathogenic microorganisms. For example, *S. aucuparia* bark extract had the highest activity against *P. aeruginosa*, *St. aureus* B209 and *C. krusei*, however, low activity against other Gram-negative bacteria and moderate activity against Gram-positive bacteria and *C. albicans*. Variation in the *S. aucuparia* bark extracts activity is consistent with data on the diversity of antibacterial activity of fruit (Boncler et al., 2017) and leaf (Turumtay et al., 2017) extracts of this species.

Bark extract of *S. domestica* had the highest activity against *E. coli*, *K. pneumoniae* and clinical strains of *P. mirabilis* and *C. albicans*, but moderate to low activity against Gram-positive bacteria (especially against *St. epidermidis*-2). Activity of *S. torminalis* bark extract was moderate against all Gram-negative bacteria and clinical fungal strains and low against collection Gram-positive bacteria (especially *St. aureus* B209), but high against both *St. epidermidis* clinical strains. The bark extract of *S. aria* showed the highest activity against *St. epidermidis*-2, while moderate to low activity against other Gram-positive bacteria, all Gram-negative bacteria and *Candida* strains. The peculiarity of the antimicrobial effect of bark extracts of natural hybrids *S. latifolia* and *S. hybrida* was moderate or high activity against almost all microbial strains. The *S. latifolia* bark

extract had relatively low activity only against *P. aeruginosa* and *P. mirabilis*, but high activity against Gram-positive bacteria and *C. krusei*. The activity of the *S. hybrida* bark extract was high both against Gram-negative and Gram-positive bacteria, and against fungal strains (especially *C. albicans*).

A similar variation in antimicrobial activity was established (Camadan et al., 2023) for leaf extracts of *S. subfusca*, *S. umbellata* and *S. persica*, which were inactive against Gram-positive bacteria (*B. subtilis*, *S. aureus* and *S. pyogenes*), while effective against Gram-negative bacteria *E. coli* and *P. aeruginosa*. The antifungal activity of *Sorbus* bark extracts against insensitive to fluconazole clinical *Candida* strains are consistent with data on ability of *S. pohuashanensis* leaf extracts to inhibit the growth of the fungus *Alternaria tenuissi* and other plant pathogens (Song et al., 2021).

The diverse antibacterial activity may indicate that the *Sorbus* bark extracts overcome the resistance of Gram-negative bacteria to plant compounds and antibiotics, which arise due to hydrophilic and negatively charged lipopolysaccharide shield around bacterial cells (Wiart et al., 2023). It is likely that *Sorbus* bark extracts could also block the efflux pumps that function in the cell walls of Gram-positive and Gram-negative bacteria and yeasts and expel antimicrobial substances to the outside.

Conclusions

Bark ethanol extracts of the genus *Sorbus* L. plants demonstrated species-specific activity against collection and clinical strains of Gram-negative and Gram-positive bacteria and *Candida* fungi. Extracts of *S. hybrida*, *S. domestica* and *S. aucuparia* plants had the widest spectrum of high antibacterial and antifungal activity.

Effective inhibition of the growth of clinical bacterial (*P. mirabilis* and two different strains of *St. epidermidis*) and fungal strains (*C. albicans* and *C. krusei*) by plant extracts was recorded in the absence of activity of the reference antibiotics ofloxacin and fluconazole.

The obtained results testify to the significant antibacterial and antifungal potential of *Sorbus* plant bark extracts and the possibility of their use for the creation of effective antimicrobial agents. Further research is needed to establish optimal methods of extraction, dosing and to test the effectiveness of the extracts in vivo.

References

- Fedoronchuk, M.M. (2017). Taksony Rosaceae flory Ukrainy: polozhennya v novii systemi rodyn, pobudovaniy za danymy molekuliarno-filogenetychnogo analizu [Taxa of Rosaceae of the Ukrainian flora: position in a new system of the family according to molecular phylogenetic data]. *Ukrainsky botanichny zhurnal [Ukrainian Botanical Journal]*, 4 (1), 3–15. <https://doi.org/10.15407/ukrbotj74.01.003> [in Ukrainian].
- Arvinte, O.M., Senila, L., Becze, A., & Amariei, S. (2023). Rowanberry – A Source of Bioactive Compounds and Their Biopharmaceutical Properties. *Plants (Basel, Switzerland)*, 12 (18), 3225. <https://doi.org/10.3390/plants12183225> [in English].
- Bailie, A., Renaut, S., Ubalijoro, E., Guerrero-Analco, J.A., Saleem, A., Haddad, P., Arnason, J.T., Johns, T., & Cuerrier, A. (2016). Phylogeographic and genetic variation in *Sorbus*, a traditional anti-diabetic medicine – adaptation in action in both a plant and a discipline. *Peer J.*, 2, e2645. <https://doi.org/10.7717/peerj.2645> [in English].
- Bobinaitė, R., Grootaert, C., Van Camp, J., Šarkinas, A., Liaudanskas, M., Žvikas, V., Viškelis, P., & Venskutonis, P.R. (2020). Chemical composition, antioxidant, antimicrobial and antiproliferative activities of the extracts isolated from the pomace of rowanberry (*Sorbus aucuparia* L.). *Food Research International*, 136, 109310. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109310> [in English].
- Boncler, M., Golanski, J., Lukasiak, M., Redzynia, M., Dastych, J., & Watala, C. (2017). A new approach for the assessment of the toxicity of polyphenol-rich compounds with the use of high content screening analysis. *PLoS ONE*, 12 (6), e0180022. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180022> [in English].
- Camadan, Y., Akyıldırım Beğen, H., Ceylan, S., Saral Sariyer, A., & Eminağaoğlu, Ö. (2023). Investigating In Vitro Antioxidant and Antimicrobial Activity of Different *Sorbus* Species in Artvin Province of Türkiye. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13 (4), 2818–2828. <https://doi.org/10.21597/jist.1259358> [in English].
- Cook, M.A., & Wright, G.D. (2022). The past, present, and future of antibiotics. *Science Translation Medicine*, 14 (657), eabo7793. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.abo7793> [in English].
- EUCAST Disk Diffusion Method for Antimicrobial Susceptibility Testing – Version 5.0 (January 2015). [Electronic resource] URL: <http://www.eucast.org/> (access date 10.03.2024) [in English].
- Kavak, D.D., & Akdeniz, B. (2019). *Sorbus umbellata* (Desf.) Fritsch var. *umbellata* leaves: Optimization of extraction conditions and investigation antimicrobial, cytotoxic, and β -glucuronidase inhibitory potential. *Plant Foods for Human Nutrition*, 74, 364–369. <https://doi.org/10.1007/s11130-019-00743-9> [in English].
- Khameneh, B., Iranshahy, M., Soheili, V., & Fazly Bazzaz, B.S. (2019). Review on plant antimicrobials: a mechanistic viewpoint. *Antimicrobial Resistance & Infection Control*, 8, 118. <https://doi.org/10.1186/s13756-019-0559-6> [in English].
- Kokoska, L., Kloucek, P., Leuner, O., & Novy, P. (2019). Plant-Derived Products as Antibacterial and Antifungal Agents in Human Health Care. *Current Medicinal Chemistry*, 26 (29), 5501–5541. <http://dx.doi.org/10.2174/0929867325666180831144344> [in English].
- Kültür, Ş. (2007). Medicinal plants used in Kırklareli Province (Turkey). *Journal of Ethnopharmacology*, 111(2), 341–364. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2006.11.035> [in English].
- Pranskuniene, Z., Ratkeviciute, K., Simaitiene, Z., Pranskunas, A., & Bernatoniene, J. (2019). Ethnobotanical study of cultivated plants in Kaisiadorys District, Lithuania: possible trends for new herbal-based medicines. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2019, Article ID 3940397. <http://dx.doi.org/10.1155/2019/3940397> [in English].
- Sak, K., Jürisoo, K., & Raal, A. (2014). Estonian folk traditional experiences on natural anticancer remedies: From past to the future. *Pharmaceutical Biology*, 52 (7), 855–866. <https://doi.org/10.3109/13880209.2013.871641> [in English].

Sarv, V., Venskutonis, P.R., & Bhat, R. (2020). The *Sorbus* spp. – Underutilised Plants for Foods and Nutraceuticals: Review on Polyphenolic Phytochemicals and Antioxidant Potential. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, 9 (9), 813. <https://doi.org/10.3390/antiox9090813> [in English].

Soltys, A., Galanty, A., & Podolak, I. (2020). Ethnopharmacologically important but underestimated genus *Sorbus*: a comprehensive review. *Phytochemistry Reviews*, 19, 491–526. <https://doi.org/10.1007/s11101-020-09674-9> [in English].

Song, C., Wang, X., Yang, J., Kuang, Y., Wang, Y., Yang, S., Qin, J., & Guo, L. (2021). Antifungal Biphenyl Derivatives from *Sorbus pohuashanensis* Leaves Infected by *Alternaria tenuissi* and Their Effect against Crop Pathogens. *Chemistry & Biodiversity*, 18(5), e2100079. <https://doi.org/10.1002/cbdv.202100079> [in English].

Turumtay, H., Midilli, A., Turumtay, E.A., Demir, A., Selvi, E.K., Budak, E.E., Er, H., Kocaimamoglu, F., Baykal, H., Belduz, A.O., Vagif Atamov, V., & Sandallı, C. (2017). Gram (-) microorganisms DNA polymerase inhibition, antibacterial and chemical properties of fruit and leaf extracts of *Sorbus aucuparia* and *Sorbus caucasica* var. *yaltirikii*. *Biomedical Chromatography: BMC*, 31 (6), e3901. <https://doi.org/10.1002/bmc.3901> [in English].

Walesch, S., Birkelbach, J., Jézéquel, G., & Haeckl, F.P.J. (2023). Fighting antibiotic resistance – strategies and (pre)clinical developments to find new antibacterials. *EMBO Reports*, 24 (1), e56033. <https://doi.org/10.15252/embr.202256033> [in English].

Wart, C., Kathirvalu, G., Raju, C. S., Nissapatorn, V., Rahmatullah, M., Paul, A. K., Rajagopal, M., Seelan, J.S.S., Rusdi, N.A., Scholastica Lanting, S., & Sulaiman, M. (2023). Antibacterial and antifungal terpenes from the medicinal Angiosperms of Asia and the Pacific: Haystacks and Gold Needles. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 28 (9), 3873. <https://doi.org/10.3390/molecules28093873> [in English].

Отримано: 21.04.2024
Прийнято: 10.05.2024



УДК 581.526.426:556.53(477.51Г)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.2>

СОСНОВІ ЛІСИ НИЖНЬОЇ ЧАСТИНИ БАСЕЙНУ РІЧКИ СНОВ ЯК РЕФУГІУМИ ДЛЯ БОРЕАЛЬНИХ ВИДІВ СУДИННИХ РОСЛИН НА ПІВДЕННІЙ МЕЖІ ЧЕРНІГІВСЬКОГО ПОЛІССЯ

Є. В. Асмаковський¹, Ю. О. Карпенко²

Лісові екосистеми виконують важливі екологічні функції, є осередками і резерватом біорізноманіття і виступають як необхідний компонент ландшафтів. У межах регіону досліджень значно поширеними виступають соснові ліси, які сформувалися на надзаплавних терасах річок і едафічно характеризується переважанням дерново – підзолистих ґрунтів. Ценотична різноманітність соснових лісів території досліджень визначається переважно типовими для поліського регіону угрупованнями, з відповідною екологічною диференціацією, специфікою умов зростання та участю рідкісних видів. Соснові ліси нижньої частини басейну річки Снов, згідно класифікаційної синтаксономічної схеми, наведеної в статті, представлені чотирма субформаціями *Piceeto (abietis) – Pineta (sylvestris)*, *Pineta (sylvestris)*, *Querceto (roboris) – Pineta (sylvestris) vacciniosa (myrtilli)* та *Betuleto (penduli) – Pineta (sylvestris)*, дев'ятьма групами асоціацій та 14 асоціаціями, серед яких найбільш репрезентативною виступає *Pineta hylocomiosa* з переважанням ценозів асоціацій як: *Pinetum hylocomiosum*, *P. vaccinioso (myrtilli) – hylocomiosum*. ас. *Pinetum (sylvestris) – amelanchieroso (ovalis) – convallariosum*. Певний науковий інтерес мають угруповання ас. *Pinetum (sylvestris) – amelanchieroso (ovalis) – convallariosum*. Різноманітність судинних рослин соснових лісів території досліджень включає 91 бореальний та суббореальний вид, які належать до 71 роду, які відносяться до 33 родин. Созологічна цінність бореальної флори регіону досліджень визначається 10 рідкісними видами судинних рослин (один вид з Червоної книги України, дев'ять видів регіонально рідкісного статусу охорони у Чернігівській області).

Ключові слова: Чернігівське Полісся, лісова рослинність, соснові ліси, бореальна флора, рівні охорони фітобіоти.

¹ аспірант кафедри екології, географії та природокористування
(Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка, м. Чернігів)
e-mail: zhekasmakovskiy@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7134-0545

² кандидат біологічних наук, доцент,
завідувач кафедри екології, географії та природокористування
(Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка, м. Чернігів)
e-mail: yuch2011@i.ua
ORCID: 0000-0002-1703-8473

PINE FORESTS OF THE LOWER PART SNOV RIVER BASIN AS REFUGIUMS FOR BOREAL SPECIES OF VASCULAR PLANTS ON THE SOUTHERN BORDER OF CHERNIHIV POLISSIA

Y. V. Asmakovskyi, Yu. O. Karpenko

Forest ecosystems perform important ecological functions, are centers and reserves of biodiversity and act as a necessary component of landscapes. Within the research region, pine forests, which were formed on the floodplain terraces of rivers and are edaphically characterized by the predominance of sod-podzolic soils, are quite common. The cenotic diversity of pine forests in the study area is determined mainly by groups typical for the Polish region, with corresponding ecological differentiation, specific growth conditions, and the participation of rare species. Pine forests of the lower part of the Snow River basin, according to the classification syntaxonomic scheme given in the article, are represented by four subformations *Piceeto (abietis)* – *Pineta (sylvestris)*, *Pineta (sylvestris)*, *Querceto (roboris)* – *Pineta (sylvestris) vacciniosa (myrtilli)* and *Betuleto (penduli)* – *Pineta (sylvestris)*, nine groups of associations and 14 associations, among which *Pineta hylocomiosa* is the most representative with a predominance of coenoses of associations such as: *Pinetum hylocomiosum*, *P. vaccinioso (myrtilli) – hylocomiosum*, *assistant Pinetum (sylvestris) – amelanchieroso (ovalis) – convallariosum*. The groups of ace have a certain scientific interest *Pinetum (sylvestris) – amelanchieroso (ovalis) – convallariosum*. The diversity of vascular plants of the pine forests of the research area includes 91 boreal and subboreal species, which belong to 71 genera, which belong to 33 families, respectively. The zoological value of the boreal flora of the research region is determined by 10 rare species of vascular plants (one species from the Red Data Book of Ukraine, nine species of regionally rare protection status in the Chernihiv region).

Key words: Chernihiv Polissia, forest vegetation, pine forests, boreal flora, phytobiota protection levels.

Вступ

Лісові екосистеми виконують важливі екологічні функції, є осередками і резерватом біорізноманіття та виступають як необхідний компонент ландшафтів. Поширення різних груп лісових екосистем визначається кліматичними, едафічними та орографічними чинниками, ландшафтними особливостями та процесами лісовідновлення. У межах регіону досліджень значно поширеними виступають соснові ліси, які сформувалися на надзаплавних терасах річок і едафічно характеризується переважанням дерново-підзолистих ґрунтів.

Вивчення соснових лісів території досліджень протягом XIX–XX ст. включає кілька етапів, серед яких інвентаризаційний етап визначається на фоні загальних питань ведення лісового господарства, проведення флористичних і геоботанічних досліджень Українського Полісся, систематизації матеріалів лісовпорядкування. У ряді робіт ботаніків (А. І. Барбарича (1955), В. О. Поварніцина (1959, 1971), Є. М. Брадїс (1977), І. С. Івченка (1977), В. К. М'якушка (1978)), наведено загальну характеристику лісової рослинності поліської частини України, зокрема і соснових лісів (Barbarych, 1955), (Povarnitsyn, 1959, 1971), (Bradis et al., 1977), (Ivchenko, 1977), (Myakushko, 1978).

У кінці XX–початку XXI ст. формується етап синфітосозологічних досліджень, у період якого продовжується вивчення флори і рослинності соснових лісів поліського регіону, результати яких систематизовано в цілому в ряді наукових праць, зокрема «Геоботанічне районування України та суміжних територій» (2003), «Рослинність України» (2005), «Фіторізноманіття Українського Полісся та його охорона» (2006), «Зелена книга України» (2009), та висвітлені науковцями, які вивчали частково і регіон досліджень (Т. А. Андрієнко (1983, 1985, 2005, 2006, 2009), Шеляг – Сосонко Ю.Р., Соломаха В. А., Воробйов Є. О. (1997, 2001, 2003, 2007, 2010)). (Andriienko et al., 1982, Andrienko 1983), (Solomakha 1996), (Bajrak 1997), (Vorobjov et al., 1997), (Sheliah-Sosonko et al., 1999). У напрацюваннях науковців Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка Лукаша О. В., Карпенка Ю. О. також висвітлені питання закономірностей розподілу лісової рослинності та поширення й охорони рідкісних видів флори Чернігівського Полісся (Sliuta, 2015).

Метою досліджень було вивчення флористичного і ценотичного різноманіття соснових лісів пониззя річки Снов як осередків бореальних видів судинних рослин. Для реалізації мети було поставлено такі завдання:

навести загальну характеристику соснових лісів та розкрити їх ценотичні особливості, скласти класифікаційну синтаксономічну схему соснових лісів нижньої частини басейну річки Снов, скласти узагальнюючий перелік видів судинних рослин бореальної групи флори та провести відповідний її аналіз стосовно систематичної структури, біоморфологічних і екологічних особливостей та соціологічної цінності.

Матеріал та методи

Стаття містить систематизовані та узагальнені результати вивчення флористичного і ценотичного складу соснових лісів на основі польових досліджень 2023 року. Маршрути досліджень попередньо формувалися за допомогою лісотаксаційних мап територій Березнянського лісництва ДП «Чернігівське лісове господарство» 2011 року лісовпорядкування (масштаб 1 : 25000) та додатку Google Maps в опції «Супутник». Для визначення синтаксономічних одиниць було використано Продромус рослинності України (Dubyna et al., 2019). Назви таксонів судинних рослин наведені за Euro+MedPlantBase – номенклатурою для вищих рослин.

Результати та їх обговорення

Дослідження проводилися на лісових територіях нижньої частини басейну річки Снов, у межах лісового фонду Березнянського лісництва ДП «Чернігівське лісове господарство», площа якого у межах Чернігівського району становить 6076 га. Територія досліджень розташована на півночі Чернігівської області та відноситься до фізико-географічної області – Чернігівського Полісся, що лежить у межах Дніпровсько-Донецької западини. Чернігівське Полісся – низовинна слабохвиляста рівнина, значну роль у формуванні ландшафтів якої відіграють крейдяні відклади. Територія досліджень відноситься до підобласті – Городнянсько-Чернігівського Полісся, що займає північну, більш підвищену та розчленовану частину області. В геоморфологічному відношенні територія досліджень відповідає області моренно-зандрових і лесових рівнин, на периферії яких розвиваються ерозійні процеси. Велика роль у збереженні та відновленні ландшафтів належить територіям природно-заповідного фонду (Baranovska et al., 2010).

Ландшафтну структуру цієї підобласті визначають рівнини з дерново-підзолистими ґрунтами, на яких поширені бори та субори з домінуванням *Pinus silvestris* L. та

домішками інших деревних порід, таких як: *Picea abies* (L.) Н. Karst., *Quercus robur* L., *Betula pendula* Roth, що виступають в якості співдомінантів або асектаторних видів. Значна частина бореальних та суббореальних видів судинних рослин поширені в межах лісових територій природно-заповідних об'єктів Березнянського лісництва ДП «Чернігівське лісове господарство».

Соснові ліси нижньої частини басейну річки Снов, згідно класифікаційної синтаксономічної схеми, наведеної нижче, представлені чотирма субформаціями *Piceeto (abietis) – Pineta (sylvestris)*, *Pineta (sylvestris)*, *Querceto (roboris) – Pineta (sylvestris)*, *vacciniosa (myrtilli) та Betuleto (penduli) – Pineta (sylvestris)*, дев'ятьма групами асоціацій та 14 асоціаціями. Найбільш репрезентативними та різноманітними виступають ценози соснових лісів, які екологічно диференційовані гідрологічними умовами – від зволжених до сухих, з відповідними флористичним і ценотичним складом.

КЛАСИФІКАЦІЙНА СХЕМА РОСЛИННОСТІ СОСНОВИХ ЛІСІВ НИЖньої ЧАСТИНИ БАСЕЙНУ РІЧКИ СНОВ

ТИП РОСЛИННОСТІ – SILVAE

Формація *Pineta sylvestris*

Субформація: *Piceeto (abietis) – Pineta (sylvestris)*

Гр. ас. *Piceeto (abietis) – Pineta (sylvestris) hylocomiosa*

1. ас. *Piceeto-Pinetum vaccinioso-hylocomiosum*

2. ас. *Piceeto-Pinetum hylocomiosum*

Субформація: *Pineta (sylvestris)*

Гр. ас. *Pineta (sylvestris) hylocomiosa*

3. ас. *Pinetum callunoso (vulgaris) – hylocomiosum*

4. ас. *Pinetum hylocomiosum*

5. ас. *Pinetum festucoso (ovinae) – hylocomiosum*

6. ас. *Pinetum pteridiosa (aquilini) – hylocomiosum*

7. ас. *Pinetum vaccinioso (myrtilli) – hylocomiosum*

Гр. ас. *Pineta (sylvestris) calamagrostidosa (epigeioris)*

8. ас. *Pinetum calamagrostidosum (epigeioris)*

Гр. ас. *Pineta (sylvestris) coryloso (avellanae) – vacciniosa (myrtilli)*

9. ас. *Pinetum coryloso (avellanae) – vacciniosum (myrtilli)*

Гр. ас. *Pineta (sylvestris) convallariosa (majalis)*

10. ас. *Pinetum (sylvestris) – amelanchi-eroso (ovalis) – convallariosum*

Гр. ас. *Pineta (sylvestris) pteridiosa (aquilini)*

11. ас. *Pinetum pteridiosum (aquilini)*

Гр. ас. *Pineta (sylvestris) moliniosa (caeruleae)*

12. ас. *Pinetum molinosum (caeruleae)*

Субформація: *Querceto (roboris) – Pineta (sylvestris)*

Гр. ас. *Querceto (roboris) – Pineta (sylvestris) vacciniosa (myrtilli)*

13. ас. *Querceto (roboris) – Pinetum (sylvestris) convallarioso*

(majalis) – vaccinosum (myrtilli)

Субформація: *Betuleto (penduli) – Pineta (sylvestris)*

Гр. ас. *Betuleto (penduli) – Pineta (sylvestris) hylocomiosa*

14. ас. *Betuleto – Pinetum festucoso (ovinae) – hylocomiosum*

Субформація ялиново-соснових лісів представлена групою асоціацій *Piceeto (abietis) – Pineta (sylvestris) hylocomiosa* та двома ценокомплексами асоціацій *Piceeto-Pinetum vaccinoso-hylocomiosum* та *Piceeto-Pinetum hylocomiosum*.

Ялиново-соснові зеленомохові ценози віком 40–80 років з співдомінуючим видом *Picea abies*. були виявлені у кількох місцях як локалітетні невеликі зволожені ділянки в лісовому заказнику «Малієво» (8, 12 та 38 квартали Березнянського лісництва). На території досліджень також було відмічено точкові поширення *Picea abies* в домішку видів *Pinus sylvestris*, *Betula pendula* і *Betula pubescens*, *Alnus glutinosa*, *Populus tremula*, рідше *Quercus robur* та ін. У кварталі 38 виявлено місцезростання червонокнижного виду *Lycopodium annotinum* L. (The Red Data book of Ukraine ...). Ценози асоціацій *Piceeto-Pinetum vaccinoso-hylocomiosum* і *Piceeto-Pinetum hylocomiosum* мають ряд бореальних видів на фоні домінування зелених мохів (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt, *Dicranum scoparium* Hedw.) з проєктивним покриттям на рівні до 70–80%.

Субформація соснових лісів представлена п'ятьма групами асоціацій, серед яких найбільш репрезентативною виступає *Pineta (sylvestris) hylocomiosa* з ценозами таких асоціацій як: *Pinetum callunoso (vulgaris) – hylocomiosum*, *P.convallarioso (majalis) – hylocomiosum*, *P.festucoso (ovinae) – hylocomiosum*, *P.pteridiosa (aquilini) – hylocomiosum*, *Pinetum vaccinoso (myrtilli) – hylocomiosum*.

Ценози *Pineta hylocomiosa* були відмічені на схилах горбів та гряд, їхніх підніжжях

та на рівних ділянках в умовах помірного зволоження на дерново-підзолистих ґрунтах та на території надзаплавних терас Сноу. Зімкненість крон у середньому на рівні 0,7–0,8. Висота *Pinus sylvestris* становить 20–22 м, подекуди досягає 24 м заввишки. *Quercus robur* зустрічаються точково лише у другому ярусі. Підлісок відсутній. Трав'яний ярус формують *Festuca ovina* L., *Nardus stricta* L., *Calluna vulgaris* (L.) Hull, *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, *Vaccinium myrtilus* L. Густих підлісок відмічали за участю *Amelanchier ovalis* Medik. У трав'яно-чагарничковому ярусі флористичне ядро складають бореальні види, зокрема: *Athyrium filix-femina* (L.) Roth ex Mert, *Dryopteris filix-mas* (L.) Schott, *Maianthemum bifolium* (L.) F.W.Schmidt, *Lactuca muralis* (L.) Gaertn., *Pyrola rotundifolia* L., *Orthilia secunda* (L.) House, *Trientalis europaea* L. У моховому покриві (місцями до 70% проєктивного покриття) представлені *Pleurozium schreberi* (до 50%), спорадично – *Dicranum scoparium*, на окремих локалітетах переважає *Polytrichum commune* Hedw., з проєктивним покриттям на рівні 70–85%.

На території досліджень у межах переважаючих ценозів соснових лісів зеленомохових (ас. *Pinetum (sylvestris) hylocomiosum*) на окремих знижених ділянках формуються фрагменти угруповань соснового лісу ламкокрушиново-колючоплаунового (ас. *Pinetum (sylvestris) franguloso (alni)-lycopodiosum (annotini)*) (Green Book..., n.d.).

На ділянці соснового лісу зеленомохового (ас. *Pinetum hylocomiosum*) виявлено два локалітети регіонально рідкісного виду *Polypodium vulgare* L. у 41 кварталі Березнянського лісництва, на узбіччі лісової дороги. Вони мають площу близько понад 10 кв.м, поряд сформовані угруповання сосняку злаково-зеленомохового з видами бореальної групи. Ще один регіонально рідкісний вид (*Chimaphila umbellata* (L.) W.Vartan.), виявлений у лісовому заказнику «Малієво» в сосновому зеленомоховому лісі (5 квартал Березнянського лісництва).

Ценози асоціації *Pinetum vaccinoso – hylocomiosum* займають незначні площі в угрупованнях соснових лісів. Сосна звичайна як домініант деревного ярусу, має зімкненість крон 0,7–0,8 та висоту 16–20 м і зустрічається на знижених, затінених ділянках. У складі деревостану також присутні *Betula pendula* і *Quercus robur*. Трав'яно – чагарничковий ярус добре розвинений з проєктивним покриттям 60–70%. У моховому

ярусі відмічається *Pleurozium schreberi*, *Dicranum rugosum*. На зволжених зниженнях у межах даної асоціації нами виявлено локалітет з *Menyanthes trifoliata* L., який фактично формує болотне «блюдне» з надмірним зволоженням.

Ценози групи асоціацій *Pineta calamagrostidosa (epigeioris)* на території досліджень займають підвищені ділянки з бідними піщаними ґрунтами, які формуються з *Betula pendula* в другому ярусі. Ліси цієї групи асоціації зростають на схилах мезорельєфних форм поряд у поєднанні з зеленомоховими сосняками. Трав'яний ярус в основному формує *Calamagrostis epigejos* (L.) Roth. з проективним покриттям на рівні 10–40%.

Угруповання ас. *Pinetum (sylvestris) – amelanchieroso (ovalis) – convallariosum* поширені в урочищах «Малієво», «Церківка», «Бігацький ліс» Березнянського лісництва. Деревний ярус формує *Pinus sylvestris* висотою 26–28 м, зімкненість крон складає 0,7–0,8. У ярусі підліску спостерігається *Amelanchier ovalis* висотою 4–6 м, місцями з густим проективним покриттям (0,6–0,8). Участь цього виду в угрупованнях соснових лісів злакових визначається штучним його походженням як результат лісорозведення і висаджування на початку ХХ століття, з подальшою реінтродукцією та поширенням природним шляхом (перенесення птахами насіння, вегетативне поновлення). У трав'яному ярусі домінує *Convallaria majalis* L. з проективним покриттям 80%. Інші види мають проективне покриття до 20%, формуючи бореальне ядро угруповання, зокрема такі види як: *Maianthemum bifolium*, *Pyrola rotundifolia*, *Orthilia secunda*, *Trientalis europaea*, *Chimaphila umbellata*.

На території досліджень регіонально рідкісний бореальний вид *Jurinea cyanooides* (L.) Rchb. виявлено на узлісній, освітленій, піщаній ділянці молодого соснового лісу надзапальної тераси, на околицях села Боромики та 113 кварталі Березнянського лісництва, на ділянці соснового лісу злаково-різнотравного, переважно сосняку куничникового.

Два локалітети регіонально рідкісного виду *Digitalis lanata* Ehrh. відмічено на відкритих лучних та узлісних куничникових ділянках сосновому підрості біля с. Моргуличі та соснових молодняків.

Угруповання *Pineta pteridiosa (aquilini)* зростають на дерново-підзолистих та піщано-супіщаних ґрунтах. У деревостані може траплятися *Quercus robur*, *Betula pendula*.

Ценози асоціації *Pinetum pteridiosum* не займають значних площ, в основному зустрічаються на добре освітлених ділянках, а також на узліссях, де *Pteridium aquilinum* має проективне покриття до 70%.

Локалітет регіонально рідкісного виду *Equisetum hyemale* L. включає 2 популяції загальної площею близько 10 кв.м, першу знайдено в угрупованні соснового лісу орлякового (ас. *Pinetum pteridiosum*), другу – у сосновому лісу злаково-різнотравному, з *Acer platanoides* L., *A. negundo* L. у другому ярусі, з *Pteridium aquilinum* (3% проективного покриття).

Угруповання субформації *Querceto – Pineta* зростають на добре розвинутих багатих ґрунтах і за видовим складом угруповань є найбагатшими суборевими ценозами, з флористичним складом близько 20 видів судинних рослин. Деревостани даної асоціації мають високу зімкненість крон на рівні 0,7 і сягають висоти 20–24 м. Перший ярус формує *Pinus sylvestris* із зімкненістю крон дерев 0,5–0,6, другий – *Quercus robur* із зімкненістю 0,2–0,3. У підліску та чагарниковому ярусі трапляються *Corylus avellana* L., *Euonymus verrucosus* Scop., *Sorbus aucuparia*. У розрідженому трав'яному ярусі (до 25%) домінують *Stellaria holostea* L., *Convallaria majalis*, зрідка трапляються *Maianthemum bifolium*. З папоротеподібних представленими є *Dryopteris carthusiana* (Vill.) H. P. Fuchs, *Dryopteris filix-mas*, *Pteridium aquilinum*. Ценози дубово-соснових лісів вирізняються значною різноманітністю, поєднанням бореальних і неморальних елементів, визначаються представленістю ряду регіонально рідкісних видів, зокрема: *Pulmonaria angustifolia* L., *Potentilla alba* L., *Fragaria moschata* Weston.

Частково поширеними на території досліджень є також дубово-соснові ліси ліщинові, які зростають на вирівняних ділянках з дерново-підзолистими супіщаними та слабопідзолистими піщаними ґрунтами, а також на схилах. Перший ярус дерев представлений *Pinus sylvestris* з домішкою *Betula pendula*, другий – *Quercus robur*. Підлісок, утворений місцями *Corylus avellana*, має зімкненість 0,2–0,4 і висоту 2–3 м. Видовий склад трав'яно-чагарничкового ярусу поєднує бореальні (*Maianthemum bifolium*, *Luzula pilosa* (L.) Willd., *Peucedanum oreoselinum* (L.) Moench, види родини *Ericaceae*). Загальне проективне покриття трав'яно – чагарничкового ярусу становить діапазон від 30 до 60%.

Ценози субформації *Betuleto – Pineta* займають незначні площі, де цікавим є підлісок, утворений *Frangula alnus*, *Sorbus aucuparia*. У трав'яно-чагарничковому ярусі з загальним проективним покриттям складає понад 50%, домінує *Calamagrostis epigejos*, також трапляються *Vaccinium vitis-idaea*, *Trientalis europaea*, *Lycopodium clavatum*, *Maianthemum bifolium*, *Luzula pilosa*, *Orthilia secunda*, на освітлених ділянках, серед злаків, відмічені поодинокі знахідки *Campanula persicifolia* L.

Різноманітність судинних рослин соснових лісів території досліджень включає 91 бореальний та суббореальний вид, які належать до 71 роду, до 33 родин.

Нижче наводимо узагальнений перелік видів судинних рослин регіону досліджень.

**УЗАГАЛЬНЕНИЙ ПЕРЕЛІК ВИДІВ
СУДИННИХ РОСЛИН БОРЕАЛЬНОЇ
ГРУПИ ФЛОРИ**

**ВІДДІА ТРАСНЕОРНУТА
ПІДВІДДІА LYCOPODIOPHYTINA**

**КЛАС LYCOPODIOPSIDA
ПІДКЛАС LYCOPODIIDAЕ**

Родина Lycopodiaceae

Lycopodium annotinum

Lycopodium clavatum L.

ПІДВІДДІА PTERIDOPHYTINA

КЛАС POLYPODIOPSIDA

ПІДКЛАС EQUISETIDAЕ

Родина Equisetaceae

Equisetum hyemale

Equisetum sylvaticum L.

Equisetum pratense L.

ПІДКЛАС POLYPODIIDAЕ

Родина Dryopteridaceae

Dryopteris carthusiana

Dryopteris filix-mas

Родина Polypodiaceae

Polypodium vulgare

Родина Dennstaedtiaceae

Pteridium aquilinum

ПІДВІДДІА SPERMATOPHYTINA

КЛАС PINOPSIDA

ПІДКЛАС PINIDAЕ

Родина: Pinaceae

Pinus sylvestris

Picea abies

Родина: Cupressaceae

Juniperus communis L.

КЛАС MAGNOLIOPSIDA

Родина Apiaceae

Peucedanum oreoselinum

Torilis japonica (Houtt.) DC.

Родина Boraginaceae

Pulmonaria angustifolia

Родина Campanulaceae

Campanula patula L.

Campanula persicifolia

Jasione montana L.

Родина Caryophyllaceae

Dianthus borbassii Vandas

Dianthus deltoides L.

Родина Adoxaceae

Sambucus nigra L.

Родина Hypericaceae

Hypericum perforatum L.

Hypericum maculatum Crantz

Родина Ericaceae

Calluna vulgaris

Chimaphila umbellata (L.) Barton

Pyrola rotundifolia

Orthilia secunda

Vaccinium myrtillus

Vaccinium vitis-idaea L.

Родина Fabaceae

Chamaecytisus ruthenicus (Fisch.) Klaskova

Genista tinctoria L.

Родина Cannabaceae

Humulus lupulus L.

Родина Lamiaceae

Ajuga reptans L.

Betonica officinalis L.

Clinopodium vulgare L.

Lycopus europaeus L.

Origanum vulgare L.

Thymus serpyllum L.

Родина Lythraceae

Lythrum salicaria L.

Родина Menyanthaceae

Menyanthes trifoliata

Родина Onagraceae

Chamerion angustifolium (L.) Holub

Родина Primulaceae

Lysimachia nummularia L.

Lysimachia vulgaris L.

Naumburgia thyrsoflora (L.) Rchb.

Trientalis europaea

Родина Polygonaceae

Persicaria hydropiper Opiz

Rumex acetosella L.

Rumex acetosa L.

Родина Rosaceae

Amelanchier ovalis

Fragaria moschata

Fragaria vesca L.

Geum urbanum L.

Potentilla alba

Potentilla argentea L.

Potentilla palustris (L.) Scop

Potentilla recta L.

Rubus caesius L.

Rubus idaeus L.

Rubus nessensis L.

Родина Plantaginaceae

Veronica chamaedrys L.

Veronica spicata L.

Veronica longifolia L.

Linaria genistifolia (L.) Mill.

Родина Orobanchaceae

Melampyrum pratense L.

Родина Violaceae

Viola tricolor L.

Родина Compositae

Antennaria dioica Gaern.

Helichrysum arenarium (L.) Moench.

Hieracium pilosella L.

Jurinea cyanoides

Родина Poaceae

Anthoxanthum odoratum L.

Brachypodium sylvaticum (Huds.) Beauv.

Calamagrostis epigejos

Corynephorus canescens (L.) Beauv.

Dactylis glomerata L.

Deschampsia cespitosa (L.) Beauv.

Festuca ovina

Koeleria glauca (Spreng.) DC.

Melica nutans L.

Molinia caerulea (L.) Moench

Nardus stricta

Poa angustifolia L.

Poa pratensis L.

Родина Trilliaceae

Paris quadrifolia L.

Родина Juncaceae

Juncus effusus L.

Luzula pilosa

Родина Agaricaceae

Calla palustris L.

Родина Asphodelaceae

Anthericum ramosum L.

Родина Convallariaceae

Convallaria majalis

Maianthemum bifolium

Polygonatum multiflorum (L.) All.

Систематичний аналіз бореальної групи флори судинних рослин пониззя річки Снов показав розподіл таксономічних груп, з переважанням різноманіття класу *Magnoliopsida*, який налічує 79 видів, 61 родів, 26 родин. Інші відділи мають незначне таксономічне різноманіття, зокрема *Lycopodiophyta* (2 види, 1 рід, 1 родина), *Equisetophyta* (2, 1, 1), *Polypodiophyta* (4, 3, 3), *Pinophyta* (3, 3, 2).

Найбільша кількість видів судинних рослин відділу *Magnoliophyta* спостерігається у родинях *Poaceae* (13 видів), *Rosaceae* (11),

Lamiaceae (6), *Scrophulariaceae* (5), *Asteraceae* (4).

Найчисельнішими родами серед судинних рослин бореальної групи виступають *Equisetum* (3 види); *Veronica* (3); *Rubus* (3); *Potentilla* (3); *Lysimachia* (2); *Lycopodium* (2); *Fragaria* (2). Інші мають по одному виду.

Згідно біоморфологічного аналізу, серед життєвих форм бореальних видів судинних рослин регіону досліджень переважають трав'янисті полікарпики (84 види, 92,3%), чагарники (5 видів, 5,5%), дерева (2 види, 2,2%).

Екологічний аналіз бореального елемента флори судинних рослин соснових лісів пониззя річки Снов показав, що за відношенням до ґрунтового зволоження (вологості) переважають мезофіти (61 вид, 67,8%), інші екологічні групи мають такий розподіл, а саме: ксеромезофіти складають 14 видів (15,6%), гігрофіти (9 видів, 10%), гігромезофіти (4 види, 4,4%), мезоксерофіти (2 види, 2,2%).

За відношенням до світла, бореальна флора судинних рослин пониззя річки Снов визначається переважанням світлолюбних рослин – геліофітів (42 види, 46,6%) та меншою представленістю інших груп, зокрема: сціогеліофіти (19 видів, 21,1%), сціофіти (17 видів, 18,9%), геліосціофіти (12 видів, 13,4%).

Досліджувана флора включає десять видів, які мають созологічні статуси та відповідну наукову цінність. Серед них, з Червоної книги України один вид – *Lycopodium annotinum*, а регіонально рідкісний статус охорони у Чернігівській області мають дев'ять видів, зокрема: *Equisetum hyemale*, *Menyanthes trifoliata*, *Campanula persicifolia*, *Chimaphila umbellata*, *Pulmonaria angustifolia*, *Pteridium aquilinum*, *Potentilla alba*, *Fragaria moschata*, *Jurinea cyanoides*.

Ценотична різноманітність соснових лісів території досліджень визначається як типовими для поліського регіону угрупованнями, так і рідкісними ценозами, які мають созологічний статус або потребують охорони на різних рівнях, виходячи з їх репрезентативності та різноманітності, участі рідкісних видів, екологічної диференціації та специфіки умов.

Висновки

Соснові ліси нижньої частини басейну річки Снов представлені чотирма субформаціям, дев'ятьма групами асоціацій та 14 асоціаціями, які екологічно обумовлені гідрологічними умовами, з відповідними

флористичним і ценотичним складом. Субформація соснових лісів представлена шістьма групами асоціацій, серед яких найбільш репрезентативною виступає *Pineta hylocomiosa* з переважанням ценозів асоціацій як: *Pinetum hylocomiosum*, *P. vaccinoso (myrtilli) – hylocomiosum*.

Систематичний аналіз бореальної групи флори судинних рослин пониззя річки Снов показав розподіл таксономічних груп, з переважанням різноманіття класу *Magnoliopsida*, яке налічує 79 видів, 61 родів, 27 родин. Найбільша

кількість видів судинних рослин даного відділу спостерігається у родині *Rosaceae* (13 видів), *Rosaceae* (11), *Lamiaceae* (6). Екологічний аналіз флори показав, що за відношенням до ґрунтового зволоження переважають мезофіти (61 вид, 67,8%), за світловим режимом – геліофіти (42 види, 46,6). Созологічна цінність соснових лісів пониззя річки Снов визначається 10 рідкісними видами судинних рослин (один вид – з Червоної книги України, дев'ять видів мають регіональний статус охорони в Чернігівській області).

Список використаних джерел

- Андрієнко Т.А. Соснові і широколистяно-соснові ліси і похідні асоціації на їх місці. Географія рослинного покриву України. Київ: Наукова думка, 1982. С. 43–80.
- Андрієнко Т.А., Шеляг-Сосонко Ю.Р. Рослинний покрив Українського Полісся в аспекті його охорони. Київ: Наукова думка, 1983. 216 с.
- Асмаковський Є.В., Карпенко Ю.О. Флористичні знахідки регіонально рідкісних видів вищих спорових судинних рослин на лісових територіях Березнянського лісництва Чернігівського лісового господарства. *Natural Resources of Border Areas under a Changing Climate. The 7th International Scientific Conference: the program, abstracts. (Ukraine, Chernihiv, September 27–29, 2023)*. Chernihiv: Publishing House “Desna Polygraph”. 2023. С. 67–68.
- Асмаковський Є.В. Лісові заказники басейну річки Снов як осередки збереження фіторізноманіття. *Євроінтеграція екологічної політики України: зб. матеріалів доп. учасн. V всеукр. наук.-практ. конф.* Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2023. С. 286–288.
- Байрак О.М. Синтаксономія соснових лісів Лівобережного Придніпров'я та участь в них епігейних лишайників. *Український фітоценотичний збірник*. 1997. Сер. А, № 1 (6). С. 85–92.
- Барановська О.В., Мирон І.В. Ландшафти Чернігівської області та їх охорона. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету*. 2010. № 1 (27). С. 76–80.
- Барбарич А.І. Флора і рослинність Полісся Української РСР. *Нариси про природу і сільське господарство Українського Полісся*. 1955. С. 289–319.
- Брадїс Є.М., Андрієнко Т.А. Поліська підпровінція. Геоботанічне районування Української РСР. Київ: Наук. думка, 1977. С. 73–136.
- Воробйов Є.О., Балашов Л.С., Соломаха В.А. Синтаксономія рослинності Поліського природного заповідника. *Український фітоценотичний збірник*. 1997. Сер. Б., № 1 (8). 128 с.
- Дубина Д.В., Дзюба Т.П., Ємельянова С.М., Вагрікова Н.О. Продромус рослинності України: монограф. Київ: Наукова думка, 2019. 782 с.
- Жежкун А.М., Порохняч І.В. Всихання соснових деревостанів Східного Полісся: поширення, наслідки, заходи подолання. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*. 2020. № 21. С. 126–134.
- Зелена книга України – Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України – офіційний сайт 2024. [Електронний ресурс]. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/bioriznomanittya/zelenaknyga-ukrayinu-2/> (дата звернення 19.04.2024).
- Івченко І.С. Нові та рідкісні види природної дендрофлори Українського Полісся. *Український ботанічний журнал : наук. журнал НАН України*. 1977. Т. 34, № 3. С. 286–290.
- Карпенко Ю.О., Асмаковський Є.В. Флористичні та ценотичні особливості ялинових угруповань лівобережної надзапавної терасової частини пониззя річки Снов (Чернігівське Полісся). Сучасні фітосозологічні дослідження в Україні: зб. наук. праць з нагоди вшанування пам'яті видатного фітосозолога, д-ра біол. наук, проф. Т.А. Андрієнко-Малюк (1938–2016 рр.). Київ: Талком, 2023. № 7. С. 5–9.
- КП «ЧЕРНІГІВОВАБЛАГРОЛІС» ЧЕРНІГІВСЬКА ОБЛАСНА РАДА [Електронний ресурс]. URL: <https://kp.chor-lis.com.ua/ourforests> (дата звернення 26.03.2024).
- Мякушко В.К. Соснові ліси рівнинної частини УССР. Київ: Наук. думка, 1978. 256 с.

Перелік регіонально рідкісних видів рослин Чернігівської області: додаток 1 до рішення дванадцятої сесії обласної ради сьомого скликання 28 березня 2018 року № 32-12/VII [Електронний ресурс]. URL: https://chor.gov.ua/images/Razdely/Norm_docum/Rishennia/7_sklykannia/12_sesiya/Dodatok_32.pdf (дата звернення 25.03.2024).

Плаун річний *Lycopodium annotinum* L. Червона книга України – офіційний сайт 2024 [Електронний ресурс]. URL: <https://redbook-ua.org/item/lycopodium-annotinum-1> (дата звернення 25.03.2024).

Поварніцин В.О. Ліси Українського Полісся. Київ: Видавництво АН УРСР, 1959. 207 с.

Поварніцин В.О. Соснові ліси Українського Полісся, Малого Полісся та Розточчя. Київ: Наукова думка, 1971. С. 21–52.

Слюта А.М. Внесок науковців Чернігівського національного педагогічного університету імені Т.Г. Шевченка у вивченні флори та рослинності Чернігівщини. *Регіональні аспекти флористичних і фауністичних досліджень* : матеріали Другої міжнар. наук.-практ. конф. (24–25 квіт. 2015 р., смт Путила, Чернівецька обл., Україна) / наук. ред. І. В. Скільський, А. В. Юзик; М – во екології та природ. ресурсів України, Нац. природ. парк «Черемоський» та ін. Чернівці: Друж Арт. 2015. С. 519–521.

Соломаха В.А. Синтаксономія рослинності України. *Український фітоценотичний збірник*. Київ, 1996. Сер. А, № 4. С. 120.

Шеляг-Сосонко Ю.Р., Устименко П.М. Ценотаксономічне різноманіття хвойних і широколистяно-хвойних лісів Українського Полісся та їх синфітосозологічна класифікація. *Український ботанічний журнал*. 1999. № 56 (2). С. 135–139.

Шеляг-Сосонко Ю.Р. Ліси України: біорізноманітність та збереження. *Укр. ботан. журн*. 2001. Т. 58, № 5. С. 519–529.

Google Maps 2024 [Електронний ресурс]. URL: <https://www.google.com.ua/maps> (дата звернення 07.07-06.10.2023).

The Euro+Med Plant Base 2024 [Електронний ресурс]. URL: <https://europlusmed.org/> (дата звернення 10.03.2024-24.03.2024).

References (translated & transliterated)

Andriienko, T.L. (1982). Sosnovi i shyrokolystiano-sosnovi lisy i pokhidni asotsiatsii na yikh misti [Pine and deciduous-pine forests and derived associations in their place]. *Heohrafiia roslynnoho pokryvu Ukrainy [Geography of vegetation cover of Ukraine]*. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].

Andriienko, T.L., & Sheliah-Sosonko, Yu.R. (1983). Roslynni pokryv Ukrainskoho Polissia v aspekti yoho okhorony [Vegetation cover of Ukrainian Polissia in the aspect of its protection]. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].

Asmakovskyi, Y.V., & Karpenko, Yu.O. (2023). Florystychni znakhidky rehionalno ridkisnykh vydiv vyschykh sporovykh sudynnykh roslyn na lisovykh terytoriiakh Bereznians'koho lisnytstva Chernihivs'koho lisovoho hospodarstva Florystychni znakhidky rehionalno ridkisnykh vydiv vyschykh sporovykh sudynnykh roslyn na lisovykh terytoriiakh Bereznians'koho lisnytstva Chernihivs'koho lisovoho hospodarstva [Floristic findings of regionally rare species higher spore vascular plants in the forest territories of the Bereznian Forestry of the Chernihiv Forestry]. *Pryrodni resursy prykordonnykh terytorii v umovakh zminy klimatu. VII Mizhnarodna naukova konferentsiia: tezy dopovidei. (Ukraine, Chernihiv, 27-29 veresnia 2023 r.) [Natural Resources of Border Areas under a Changing Climate. The 7th International Scientific Conference: the program, abstracts. (Ukraine, Chernihiv, September 27-29, 2023)]*. (pp. 67–68). Chernihiv: Publishing House “Desna Polygraph” [in Ukrainian].

Asmakovskyi, Y.V. (2023). Lisovi zakaznyky basejnu richky Snov iak osередky zberezhennia fitoriznomanittia [Forest reserves of the Snov River basin as centers of biodiversity conservation]. *Yevrointehratsiia ekolohichnoi polityky Ukrainy: zb. materialiv dop. uchasn. V vseukr. nauk.-prakt. konf. [European integration of the environmental policy of Ukraine: coll. additional materials participation V All-Ukrainian of science-practice conf.]*. Odesa: Odeskyj derzhavnyj ekolohichnyj universytet [in Ukrainian].

Bairak, O.M. (1997). Syntaksonomiia sosnovykh lisiv Livoberezhnoho Prydniprovia ta uchast v nykh epiheinykh lyshainykyv [Syntaxonomy of pine forests of the left bank Dnieper region and the participation of epigeal lichens in them]. *Ukrainskyi fitotsenotychnyi zbirnyk [Ukrainian phytocenotic collection]*, Ser. A, 1(6), 85–92 [in Ukrainian].

Baranovska, O.V., & Myron, I.V. (2010). Landshafty Chernihivskoi oblasti ta yikh okhorona [Landscapes of Chernihiv region and their protection]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu [Scientific notes of the Ternopil National Pedagogical University]*, 1 (27), 76–80 [in Ukrainian].

Barbarych, A.I. (1955). Flora i roslynnist Polissia Ukrainiskoi RSR [Flora and Vegetation of Polissia of the Ukrainian SSR]. *Narysy pro pryrodu i silske hospodarstvo Ukrainiskoho Polissia [Essays on the nature and agriculture of the Ukrainian Polissia]*. Kyiv: Vydavnytstvo Kyivskoho universytetu [in Ukrainian].

Bradis, Ye.M., & Andriienko, T.L. (1977). Poliska pidprovintsii. Heobotanichne raionuvannya Ukrainiskoi RSR [Polissya subprovince. Geobotanical zoning of the Ukrainian SSR]. Kyiv: Nauk. dumka [in Ukrainian].

Vorobiov, Ye.O., Balashov, L.S., & Solomakha, V.A. (1997). Syntaksonomiia roslynnosti Poliskoho pryrodnoho zapovidnyka [Syntaxonomy of vegetation of the Polissya Nature Reserve]. *Ukrainskyi fitotsenotychnyi zbirnyk [Ukrainian phytocenotic collection]*, Ser. B., 1(8), 128 [in Ukrainian].

Dubyna, D., Dziuba, T., Iemelianova, S., Davydov, D., Vynokurov, D., Kuzemko, A., Pashkevych, N., Kozyr, M., Iakushenko, D., Borsukevych, L., Fitsailo, T., Dvoretzkyi, T., Didukh, Y., Chorney, I., & Sheliag-Sosonko, Y. (2019). Prodrumy roslynnosti Ukrainy [Prodrome of the vegetation of Ukraine]. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].

Zhezhkun, A.M., & Porokhniach, I.V. (2020). Vsykhannia sosnovykh derevostaniv Skhidnoho Polissia: poshyrennia, naslidky, zakhody podolannya [Drying of pine stands in Eastern Polissia: distribution, consequences, measures to overcome]. *Naukovi pratsi Lisivnychoi akademii nauk Ukrainy [Scientific works of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine]*, 21, 126–134 [in Ukrainian].

Zelena knyha Ukrainy – Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy. Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy – ofitsiinyi sait 2024 [Green Book of Ukraine – Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. The Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine is the official website] [Electronic resource]. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/bioriznomanittya/zelena-knyga-ukrayiny-2/> (access date 19.04.2024) [in Ukrainian].

Ivchenko, I.S. (1977). Novi ta ridkisni vydy pryrodnoyi dendroflory Ukrayins`kogo Polissya [New and rare species of natural dendroflora of Ukrainian Polissia]. *Ukrayins`kyj botanichnyj zhurnal : nauk. zhurnal NAN Ukrayiny [Ukrainian Botanical Journal: Science. Journal of the National Academy of Sciences of Ukraine]*, 34, 3, 286–290 [in Ukrainian].

KP «Chernihivoblahroli» Chernihivska oblasna rada (2024). [CP «Chernihivoblahroli» Chernigiv regional council] [Electronic resource]. URL: <https://kp.chor-lis.com.ua/ourforests> (access date 26.03.2024) [in Ukrainian].

Karpenko, Yu.O., & Asmakovskyi, Y.V. (2023). Florystychni ta tsenotychni osoblyvosti yalynovykh uhrupovan livoberezhnoi nadzaplavnoi terasovoi chastyny ponyzzia richky Snov (Chernihivske Polissia) [Floristic and coenotic features of spruce communities of the left-bank terraced part of the lower reaches of the Snov River (Chernihiv Polissia)]. *Suchasni fitosozologichni doslidzhennia v Ukraini: zb. nauk. prats z nahody vshanuvannia pam`iati vydatnoho fitosozologa, d-ra biol. nauk, prof. T.L. Andriienko-Maliuk (1938–2016 rr.) [Modern phytosociological research in Ukraine: coll. of science works on the occasion of honoring the memory of the outstanding phytosociologist, Dr. Biol. Sciences, Prof. T.L. Andriienko-Malyuk (1938–2016)]*, 7, 5–9 [in Ukrainian].

Perelik rehionalno ridkisnykh vydiv roslyn Chernihivskoi oblasti: dodatok 1 do rishennia dvanadtsiatoi sesii oblasnoi rady somoho sklykannia 28 bereznia 2018 roku № 32-12/VII (2018). [List of regionally rare plants species of the Chernihiv region (NIH Publication No. 32-12/VII). The Chernihiv Regional State Administration] [Electronic resource]. URL: https://chor.gov.ua/images/Razdely/Norm_docum/Rishennia/7_sklykannia/12_sesiya/Dodatok_32.pdf (access date 25.03.2024) [in Ukrainian].

Plaun richnyi Lycopodium annotinum L. Chervona knyha Ukrainy – ofitsiinyi sait 2024 [Lycopodium annotinum L. Red Data Book of Ukraine – official site 2024] [Electronic resource]. URL: <https://redbook-ua.org/item/lycopodium-annotinum-1> (access date 25.03.2024) [in Ukrainian].

Myakushko, V.K. (1978). Sosnovi lisy rivnynnoi chastyny USSR [Pine forests of the plain part of the Ukrainian SSR]. Kyiv : Nauk. dumka. 256 p. [in Ukrainian].

Povarnitsyn, V.O. (1959). Lisy Ukrainiskoho Polissia [Forests of Ukrainian Polissia]. Kyiv: Vydavnytstvo AN URSSR [in Ukrainian].

Povarnitsyn, V.O. (1971). Sosnovi lisy Ukrainського Polissia, Maloho Polissia ta Roztochchia [Pine forests of Ukrainian Polissia, Small Polissia and Roztochia]. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].

Sheliah-Sosonko, Yu.R., & Ustymenko, P.M. (1999). Tsenotaksonomichne riznomanittia khvoynykh i shyrokolistiano-khvoynykh lisiv Ukrainського Polissia ta yikh synfitosozologichna klasyfikatsiia. Ukrainьkyi botanichnyi zhurnal [Cenotaxonomic diversity of coniferous and broad-leaved coniferous forests of Ukrainian Polissia and their synphytosozological classification]. *Ukrainьkyi botanichnyi zhurnal [Ukrainian botanical journal]*, 56 (2), 135–139 [in Ukrainian].

Shelyag-Sosonko, Yu.R. (2001). Lisy Ukrayiny: bioriznomanitnist ta zberezheniya [Forests of Ukraine: biodiversity and conservation]. *Ukr. botan. zhurn [Ukr. bot. journ.]*, 58, 5, 519–529 [in Ukrainian].

Sliuta, A. M. (2015). Vnesok naukovtsiv Chernihivskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni T.H. Shevchenka u vyvchenni flory ta roslynnosti Chernihivshchyny [Contribution of scientists of Chernihiv National Pedagogical University named after T.G. Shevchenko in the study of flora and vegetation of Chernihiv region]. *Rehionalni aspekty florystychnykh i faunistychnykh doslidzhen: materialy Druhoi mizhnar. nauk.-prakt. konf. (24–25 kvit. 2015 r., smt Putyla, Chernivetska obl., Ukraina) [Regional aspects of floristic and faunal research: materials of the Second International science and practice conf. (April 24-25, 2015, Putyla village, Chernivtsi region, Ukraine)]*. 519–521 [in Ukrainian].

Solomakha, V.A. (1996). Syntaksonomiia roslynnosti Ukrainy [Syntaxonomy of vegetation of Ukraine]. *Ukrainьkyi fitotsenotychnyi zbirnyk [Ukrainian phytocenotic collection]*, Ser. A, 4, 120 [in Ukrainian].

Google Maps 2024. [Electronic resource]. URL: <https://www.google.com.ua/maps> (access date 07.07.2023-06.10.2023) [in Ukrainian].

The Euro+Med Plant Base 2024. [Electronic resource]. URL: <https://europlusmed.org> (access date 10.03.24-24.03.2024) [in English].

Отримано: 25.04.2024

Прийнято: 13.05.2024



УДК (574.591.24.11.594(262.5).(1-16)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.3>

ЕКОЛОГІЧНІ ЧИННИКИ В ФОРМУВАННІ КІЛЬКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЛЮСКІВ ТИМЧАСОВОГО КОМПОНЕНТУ МЕЙОБЕНТОСУ ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОЇ ЧАСТИНИ ЧОРНОГО МОРЯ

Л. В. Воробйова¹

Молюски, розміри тіла яких дозволяють їм перебувати у складі мейобентосу лише за короткий період свого життєвого циклу, відносяться до псевдомейобентосу (тимчасовий компонент мейофауни). Незважаючи на свої малі розміри, молодь молюсків відіграє істотну роль у морських екосистемах, сприяючи розвитку та відновленню донних біоценозів. Молюски псевдомейобентосу – важливий кормовий об'єкт для молоді та дорослих форм донної і придонної бентосоїдної іхтіофауни. Показники щільності поселень та його біомаси можуть бути використанні при моніторингу якості морського середовища. За щільністю популяції та біомасою більшість псевдомейобентосу північно-західної частини Чорного моря представлена переважно молодими двостулковими молюсками та поліхетами. Гастроподи в наших дослідженнях зустрічалися із дуже низькою щільністю поселень.

*Особливості формування кількісних характеристик молюсків, які розглянуті на базі результатів обробки 520 кількісних проб, зібраних в Одеському морському регіоні у 1994–2015 рр. наводяться вперше. Розглянуто вплив основних екологічних факторів (тип субстрату, глибина, кисневий режим) на формування кількісних показників молюсків категорії мейобентосу. Тип донного субстрату є одним із найважливіших екологічних факторів формування різноманітності, щільності поселень і біомаси молоді молюсків. Висока щільність молюсків характерна для кам'янистого субстрату, черепашки з мулом і черепашки з піском у літній період. Найвищі їх показники обмежені глибиною 10–15 м. На мілководді чисельність низька, що пов'язано з поїданням їх молоддю іхтіофауни. Аналіз показників чисельності *Bivalvia* для різних умов показав, що вона є найменшою за показників 1–4 O₂ мг/л. Зі зростанням умісту розчиненого у воді кисню чисельність молюсків збільшується.*

Ключові слова: молюски, мейобентос, екологічні фактори, північно-західний шельф Чорного моря.

¹ доктор біологічних наук, професор, провідний науковий співробітник
(Інститут біології моря НАН України, м. Одеса)
e-mail: vorobyova.meio@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5536-8836

ENVIRONMENTAL FACTORS IN THE FORMATION OF QUANTITATIVE CHARACTERISTICS OF MOLLUSCS OF THE TEMPORARY COMPONENT OF MEIOBENTOS IN THE NORTHWESTERN PART OF THE BLACK SEA

L.V. Vorobyova

Molluscs whose body sizes allow them to be part of the meiobenthos only for a short period of their life cycle belong to the pseudomeiobenthos (a temporary component of the meiofauna). Despite their small size, young molluscs play a significant role in marine ecosystems, contributing to the development and restoration of bottom biocenoses. Pseudomeiobenthos molluscs are an excellent forage object for young and adult forms of benthic and demersal benthic ichthyofauna. Indicators of the density of settlements and its biomass can be used in monitoring the quality of the marine environment. In terms of population density and biomass, the majority of the pseudomeiobenthos of the northwestern part of the Black Sea is represented mainly by young bivalve molluscs and polychaetes. Gastropods were encountered in our studies with a very low population density. Features of the formation of quantitative characteristics of molluscs, which are considered based on the results of processing 520 quantitative samples collected in the Odesa Sea Region in 1994–2015, are given for the first time. The influence of the main environmental factors (substrate type, depth, oxygen regime) on the formation of quantitative indicators of molluscs of the meiobenthos category was considered.

*The type of bottom substrate is one of the most important ecological factors for the formation of the diversity, density of settlements and biomass of young molluscs. A high density of molluscs is characteristic of stony substrate, shell with silt and shell with sand in the summer period. Their highest indicators are limited to a depth of 10–15 m. In shallow water, the number is low, which is due to their eating by young ichthyofauna. Analysis of *Bivalvia* abundance indicators for various conditions showed that it is the lowest for indicators of 104 O₂ mg/l. With an increase in dissolved oxygen, the number of mollusks increases.*

Key words: molluscs, meiobenthos, ecological factors, northwestern shelf of the Black Sea.

Вступ

Вивчення мейобентосу Чорного моря було розпочато більше, ніж на 50 років пізніше у порівнянні з макрозообентосом. Термінологія та методи обробки були прийняті на конференції у Тунісі лише у 1971 р. (Hulings & Gray, 1971). У мейобентосному угрупованні донних безхребетних організмів прийнято виділяти постійний чи еумейобентос (permanent meiofauna) і тимчасовий (temporary meiofauna) компоненти поміняти місцями - має бути (McIntyre & Murison, 1973; Giere, 2009).

За щільністю та біомасою більшість псевдомейобентосу північно-західної частини Чорного моря (ПЗЧМ) складається переважно з молодих двостулкових молюсків та поліхет. Багато мейобентологів часто нехтують вивченням псевдомейобентосу, мотивуючи його меншою чисельністю порівняно з еумейобентосом. На жаль, для Чорного моря існує дуже мало спеціальних досліджень, які б показали особливості формування цієї тимчасової складової мейобентосу. Водночас ювенільна макрофауна може становити значну частину біомаси мейобентосу (Thorson, 1966) чи його продукції (Yingst, 1978).

Молодь молюсків, яка належать до тим-

часової категорії мейобентосу, з подальшим розвитком і ростом особин переходять у категорію макрозообентосу. Незважаючи на свої малі розміри тіла, молодь молюсків відіграє істотну роль у морських екосистемах. Насамперед, вони сприяють розвитку та відновленню донних біоценозів. Крім того, молодь молюсків – чудовий кормовий об'єкт для молоді та дорослих форм донних та придонних представників іхтіофауни. Також показники щільності поселень та його біомаси можуть бути використані при моніторингу в оцінці якості морського середовища особливо у евтрофних акваторіях. В умовах кризи для організмів морського бентосу (високе антропогенне навантаження, дефіцит кисню в придонних шарах води, низька солоність тощо) їхня частка в загальних показниках різко зменшується. Залежно від набору різних абіотичних факторів, динамічність їх кількісних характеристик у мейобентосі може значно варіювати. За сприятливих умов для проходження стадій метаморфозу чисельність та біомаса молоді молюсків та поліхет можуть відігравати істотну роль у формуванні загальних для всього мейобентосного угруповання показників щільності та біомаси. Таким чином, щільність псевдоме-

йобентосу може бути непрямим показником екологічної ситуації у бенталі. Мета наших багаторічних досліджень – встановити важливість екологічних факторів у формуванні щільності поселень молюсків у ПЗЧМ (Одеський морський регіон).

Матеріал і методи

Особливості формування кількісних характеристик молюсків тимчасового компонента мейобентосу розглянуто на основі результатів обробки 520 кількісних проб, зібраних в Одеському морському регіоні (ОМР) у 1994–2015 роках. Кількісних даних щодо осідання личинок молюсків із пелагіалі в бенталь для шельфу Чорного моря вкрай мало, що пояснюється, насамперед, складністю видової діагностики ранніх стадій онтогенезу цих молюсків. Нами не вивчалися екологічні характеристики окремих видів молюсків. Наведені дані стосуються закономірностей формування показників загальної щільності поселень для всіх двостулкових молюсків та гастропод. Вивчалися такі екологічні фактори: тип донного субстрату, глибина, температурний режим, вплив кисневого режиму у придонних шарах води, висновки зроблені на основі аналізу 520 кількісних проб. Кількісні показники молюсків наводяться на основі середнього арифметичного $\pm se$ (помилка середнього). Район відбору зразків та методи їх збору та обробки описані раніше (Воробйова, 1999; 2017).

Результати та обговорення

На розподіл мейофауни впливають різні фактори, зокрема фізичні властивості відкладень (Giere, 2009). Залежно від сукупності абіотичних факторів динаміка кількісних характеристик у мейобентосі може істотно змінюватися. У період масового розселення личинок молюсків у межах донних угруповань багато з них, досягнувши донного субстрату, знищуються дорослими безхребетними. (Thorson, 1958, 1964, 1966). У цих випадках майбутня структура дорослих популяцій окремих видів може мати вплив на ті види, які є взаємно нейтральними у дорослому стані. За сприятливих умов для проходження стадій метаморфозу для тимчасової мейофауни чисельність і біомаса ювенільних молюсків і поліхет можуть відігравати істотну роль у формуванні показників щільності і біомаси, загальних для всього мейобентосного угруповання (Watzin, 1983).

Щільність поселень молоді молюсків на донному субстраті залежить від своїх личи-

нок у пелагіалі. У свою чергу, динаміка формування щільності планктонних личинок донних безхребетних залежить, по-перше, від термінів та інтенсивності нересту батьківських форм, по-друге, кількісна представленість їх у бенталі визначається тривалістю їхньої пелагічної стадії; по-третє – від втрат личинок внаслідок виносу за межі дорослої популяції. Так, з одного боку, пелагічний період сприяє більшому розселенню молюсків, з іншого, призводить до збільшення смертності через хижацтво або занесення в несприятливі умови в нижніх шарах води біля дна. У Чорному морі зі своєрідних гідрологічних умов гине величезна кількість личинок зообентосних форм, які заносяться на значну відстань від берега з глибинами понад 150–200 м.

Дуже важливим є вивчення впливу екологічних факторів на формування кожного великого таксону тимчасового компонента мейобентосу і, зокрема, молюсків. Слід зазначити, що у Чорному морі особливо слабо вивчені ті його зони, які перебувають під значним впливом антропогенного евтрофування. Північно-західна частина є прикладом такого максимального негативного впливу антропогенних чинників.

Наші спостереження на початку нинішнього століття показали, що осідання личинок макрзообентосних форм, і особливо молюсків, із пелагіалі в бенталь проходить у СЗЧМ із великими втратами через несприятливі умови для існування і проходження личинками різних стадій розвитку (дефіцит або повна відсутність кисню, велика кількість суспензії тощо). У період масового осідання для личинок та молоді двостулкових молюсків характерна мозаїчність у розподілі їх кількісних показників. Існує досить виражена вибірковість личинок різних видів стосовно субстрату. Велике значення мають величина частинок і проміжків між ними в донних опадах (Wilson, 1960, 1991), структура, контур поверхні субстрату, а також його освітленість (Thorson, 1964). Крім того, велике значення при виборі відповідного субстрату для осідання личинок мають його хімічні властивості (Scheltema, 1961; Willians, et al., 1964). Активне осідання личинок та успішне завершення метаморфозу уможливорює поповнення та відновлення донних угруповань. Відомо, що за відсутності потрібного субстрату метаморфоз у личинок може затримуватись. Так, у личинок *Mytilus edulis* на 40 днів при температурі 10 °C). Особливо сильно ця здат-

ність розвинена у личинок з чітко вираженою вибірковістю субстрату у їхніх дорослих батьківських форм, які найчастіше мешкають у вузько прибережних зонах. Фізичні властивості субстрату мають вирішальну роль. Найчастіше на вибір субстрату великий вплив надають його хімічні властивості неорганічного та органічного походження.

Як відомо, в прибережній зоні Одеської затоки ще в минулому столітті були споруджені берегозахисні бетонні траверси та хвилеломи, які простираються вздовж узбережжя на багато кілометрів. Для молюсків бетон є добрим субстратом для осідання та подальшого розвитку. Звичайно молюски селяться ближче до поверхні води на глибині 0–0,5 м. При досягненні розмірів макрзообентосу і статевозрілого віку вони поповнюють личинками пелагіаль не лише Одеської затоки, а й далеко за її межами. Наші дослідження показали, що на траверсах штучних басейнів *Bivalvia* представлені мідією та мітіястером. Загальна їх щільність досягає на поверхні траверсів басейнів значних показників (в середньому 29500 екз.·м⁻²–36300 екз.·м⁻²), тоді як на дні відзначені показники 4000 екз.·м⁻² та 3800 екз.·м⁻² відповідно для різних басейнів. Зі збільшенням глибини щільність молюсків зменшується майже в півтора рази. Аналогічна картина спостерігалася й у розподілі показників біомаси молюсків та його частки у кількості мейобентосу. Так, наприклад, у поверхневому шарі вона становила в середньому 48.0% від загальної біомаси всього мейобентосу, на нижчих горизонтах – вдвічі менше – в середньому 24%.

Багаторічні дослідження дозволили виявити залежність формування чисельності молоді молюсків у залежності від типу донного ґрунту. Найвищі середні показники щільності поселень двостулкових молюсків властиві черепашнику з піском та твердому

субстрату (табл. 1). Ця сама закономірність відзначалася нами й у загальних показників псевдомейобентосу (Воробйова, 2021). Молодь гастропод відзначена нами на черепашнику з домішкою піску (в середньому 1101,0±313,4 екз. м⁻²) та на кам'янистому субстраті з водоростями. Максимальна чисельність молоді молюсків зареєстрована у районі Григорівського лиману (чорний мул, глибина 20 м) – 80000 екз. м⁻².

Чисельність молоді мітіалід на донному субстраті тісно залежить від часу вимету гамет та розвитку личинок молюсків у пелагіалі. Відомо, що в планктоні личинки мідії дають весняний спалах при температурі води 10–12 °С і холодна затяжна весна зазвичай зсуває терміни розмноження. Таким чином, температурний режим є дуже важливим фактором у термінах розвитку личинок у пелагіалі. Осінній пік розмноження пов'язується, крім того, з піком великої кількості дрібного фітопланктону. Середня тривалість знаходження личинок мідій у планктоні за умов Чорного моря 3–4 тижні, а іноді 1,5 місяці.

Для різних районів Чорного моря авторами вказуються різні терміни масового осідання личинок двостулкових молюсків, що природно пов'язано з різними показниками температури морської води в цих акваторіях. За можливості вибору мідії обирають шорсткі поверхні каміння і нитчасті структури водоростей. Нами проведені дослідження з динаміки осідання личинок на субстрат берегозахисних споруд (траверси, хвилеломи) у прибережній зоні Одеської затоки при показниках температури 12-22-12 °С (травень-листопад). Серед личинок двостулкових молюсків, що осіли на траверсах у мідієвих обростаннях, а також на піщаному субстраті, переважали личинки мідії і мітіястер із незначною домішкою церастодерми. Як було ска-

Таблиця 1
Чисельність *Bivalvia* на різному субстраті та їх частка у псевдомейобентосі та в загальній щільності мейобентосу

Субстрат	Екз. м ⁻²	% від псевдомейо-бентосу	% від загального мейобентосу
Мулистий	2529,6±461	21,6	0,73
Пісок/мул	5847,0±2993,3	37,9	2,63
Черепашник	5425,3±4162,0	36,8	7,30
Черепашник /мул	12145,1±6867,0	36,8	7,52
Черепашник /пісок	9376,6±2603,3	30,3	3,61
Каміння, перифітон	2125–15481	41,8–46,0	10,8–12,0

зано вище при більш тривалому весняному прогріві води осідання личинок на субстрат може затриматися, що й було зафіксовано нашими дослідженнями. У травні при температурі 12 °С молодь двостулкових молюсків була відсутня як на траверсах, так і на піщаному субстраті. Перший пік осідання був характерним для липня (18,2 °С). До середини і другої половини літа чисельність личинок молюсків знижується, що можна пояснити переходом в іншу вікову категорію (макрозообентос). На траверсах простежується другий пік осідання (серпень-вересень), особливо чітко виражений на верхніх і нижніх горизонтах бетонних споруд. На піщаному субстраті другий пік дещо згладжений у найбільш мілководних зонах басейнів. Мінімальні показники чисельності встановлюються до середини листопада (12 °С). Молодь черевоногих молюсків не зустрічалася на піщаному субстраті, в обростаннях мідій відзначені лише з кінця липня (щільність 2500–22000 екз. м⁻²). У вересні їх кількість збільшується до 11600 екз. м⁻². Максимальні показники чисельності характерні для листопада. Необхідно враховувати і те, що мейобентос, будучи цінним кормовим об'єктом для молоді та деяких статево-зрілих риб (наприклад, кефалевих), може значною мірою піддаватися виїданню ними у певні сезони року.

Роботи багатьох авторів (Thiel, 1971; McIntyre & Murison, 1973) підтверджують наявність прямих або опосередкованих зв'язків між кількістю мейобентосу і глибиною морської води. Слід зазначити, що залежність між концентрацією мейобентосу та глибиною є важливим інтегральним чинником, тому що на різній глибині ПЗЧМ дуже різні характеристики субстрату, динаміка придонних шарів води, накопичення автохтонної та аллохтонної органіки. Так, при масовому розвитку фітопланктону їх подальше осідання на дно відбувається на глибині більш ніж 10 м (Нестерова і Теренько, 2000; Nesterova, 2008). Цей фактор особливо

важливий для ПЗЧМ Чорного моря, яка має неоднорідні та динамічні умови абіотичних факторів. Багаторічні дослідження в районі ОМР дозволили встановити неоднорідність кількісних показників тимчасової складової мейобентосу навіть на таких відносно невеликих глибинах шельфової зони (табл. 2).

За нашими багаторічними спостереженнями осідання личинок молюсків у ПЗЧМ із пелагіалі в бенталь та успішна реалізація їх метаморфозу відбувається на глибинах до 50 метрів. Це, як правило, характерно для більшої частини чорноморського шельфу. Далі до глибини 125 м і більше набуває розвитку *Modiolus phaseolinus* (Philippi). У зонах підвищеної евтрофікації із характерним їм періодичним формуванням великих зон гіпоксії можливість успішного розвитку личинок від стадії великонхів до розмірної категорії, яка дозволяє їм перейти в категорію макрозообентосу, різко скорочується. Навіть за сприятливого температурного режиму та якості субстрату личинки, що осіли на дно, масово гинуть через дефіцит кисню. Аналіз розподілу їх щільності поселень у різних районах Чорного моря (середина 90-х років) дозволив встановити, що найбільша чисельність личинок і молоді молюсків на кавказькому шельфі, дещо менша на кримському і найнижча на північно-західному. Відповідно, розподіляються його частки у кількості мейобентосу: на кавказькому шельфі вона становила 29,7%, на кримському була 7,5%, на СЗЧМ становила 2,1% від загальної кількості організмів.

Молодь молюсків – цінний кормовий об'єкт для багатьох представників іхтіофауни, за калорійністю вона не поступається гарпактикоїдам та остракодам (Воробійова і Таргонська, 1998). Відомо, що в Чорному морі і в річках, що впадають у нього, достовірно розмножуються близько 100 видів власне морських і прохідних риб. При цьому, личинки та мальки не менше 90 таких видів нагулюються, в основному, у прибережній зоні моря, на глибині до 5 м (Зайцев, 2005).

Таблиця 2

Розподіл середніх показників чисельності мейобентосу (екз. м⁻²) в Одеській затоці у серпні 1993 р.

Таксон	Глибина, м					
	2,5-4		5-7		10-15	
	екз. м ⁻²	%	екз. м ⁻²	%	екз. м ⁻²	%
Gastropoda	63	0,1	2611	0,8	150	0,05
Bivalvia	4438	5,1	8722	2,8	150	0,05
Псевдомейобентос	8064	9,3	35945	11,6	2625	0,8
Мейобентос (всього)	86627	100,0	307979	100,0	325700	100,0

Крім того, багато видів бичків, малі південні колюшки, морські собачки використовують кам'янистий субстрат для відкладання ікри. Мала глибина приваблює молодь багатьох донних риб різноманітністю харчових ресурсів. Молодь бичків, султанки (*Mullus barbatus ponticus*), атерини чорноморської (*Atherina boyeri pontica*), анчоуса (*Engraulis encrasicolus*), кефали (*Mugilidae*) та інших риб живляться тут дрібними поліхетами, молюсками та ракоподібними. У період масового осідання личинок у межах донних угруповань значна їх частка після досягнення дна знищуються дорослими донними безхребетними (Thorson, 1958, 1964).

Як зазначалося вище, проби відбиралися у літній період, коли в прибережній зоні формуються комфортні умови для розвитку та росту молоді молюсків. Низька щільність тут поселень, ймовірно, пояснюється значним їх видаленням представниками іхтіофауни.

На глибині понад 15 м мейобентос носить чітко виражений нематодно-форамініферний характер, що свідчить про складну екологічну ситуацію біля дна. В останньому випадку різко знижується кормова цінність мейобентосу, а також можливість поповнення біоценозів макрзообентосу двостулковими молюсками через низьку виживання їх личинок і молоді в цих умовах. На глибині 16–20 м переважали мулісти ґрунти, лише в деяких випадках із додаванням черепашки (рис. 1).

Молодь черевоногих молюсків зареєстрована в основному влітку та восени 2012–2013 рр. із низькою щільністю (в середньому $296,1 \pm 158,2$ екз. m^{-2}).

Як ми бачимо з наведених даних, найсприятливіші умови для розвитку представників псевдомейобентосу знаходяться в діапазоні глибин до 16 м, потім із збільшенням глибини чисельність розглянутої категорії мейобентосу зменшується.

В районі Одеського морського регіону більша кількість тимчасового компонента мейобентосу відмічається на черепашнику/піску та замуленому черепашнику. Молодь черевоногих молюсків не зустрічалася на піщаному субстраті, в обростаннях мідій відзначені лише з кінця липня (щільність 2500–22000 екз. m^{-2}). У вересні їх кількість збільшується до 11 600 екз. m^{-2} . Максимальні показники чисельності характерні для листопада.

Кисневий режим має ключове значення у формуванні біологічної різноманітності та кількісних показників представників мейобентосу (Levin et al., 2002; Sellanes & Neira, 2006). За дефіциту кисню в придонних шарах води відбуваються порушення процесів життєдіяльності їх мешканців. Найчастіше виникнення гіпоксії є наслідком спільних процесів природних і антропогенних чинників. За дефіциту кисню у придонних шарах води організми, що мешкають на поверхні ґрунту, здебільшого гинуть, несприятливі умови переживають лише безхребетні, що мешкають у товщі ґрунту. Гіпоксія та пов'язані з нею замори викликають не лише суттєву зміну відсоткового співвідношення представників мейобентосу, а й переважно зменшення частки псевдомейобентосу та, зокрема, молюсків у загальній чисельності та біомасі організмів. Через дефіцит кисню личинки молюсків, навіть потрапляючи в бенталь, у переважній більшості гинуть. Так, наші дослідження у ПЗЧМ у 90-х роках минулого століття, коли на більшій частині шельфу спостерігалася гіпоксія у придонних шарах води, показали, що частка псевдомейобентосу в загальній його чисельності становила в Одеській затоці в середньому 1,9%, влітку – 0,84%, восени – 0,9%. При цьому, молюски зовсім були відсутні або відзначалися одиничними екземплярами (Воробйова, 1990).

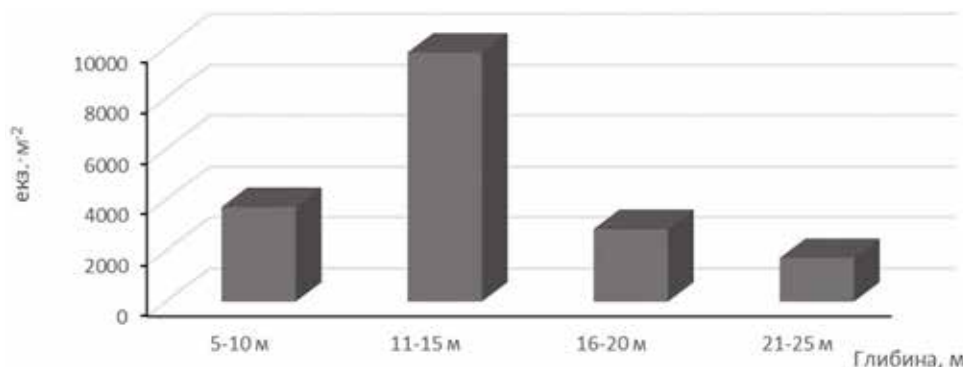


Рис. 1. Показники середньої чисельності (екз. m^{-2}) *Bivalvia* в залежності від глибини

Порівняння середніх показників щільності поселень молоді двостулкових молюсків ОМР 1984 і 1990 рр. показали, що в 90-ті роки, коли гіпоксія охоплювала майже весь простір придонних шарів, чисельність молюсків була в 158,25 разів нижча (303216,2 екз. м⁻² у 1984 р. і 1916,0 екз.м⁻² у 1990). Наші багаторічні спостереження (1994–2017 рр.) дозволили простежити за формуванням чисельності поселень двостулкових молюсків у сучасний період залежно від кисневого режиму біля дна в ОМР. Аналіз отриманих даних показав, що найбільш несприятливі умови для виживання личинок бівальвій, що осіли на субстрат, складаються при вмісті розчиненого у воді кисню від 1 до 4 О₂ мг/л. (654,4 екз. м⁻²). У міру поліпшення якості довкілля (5–7 О₂ мг/л) щільність поселень двостулкових молюсків збільшувалася і становила в середньому 1250 екз. м⁻² (рис. 2).

За вмісту розчиненого у воді кисню до 11 мг/л щільність поселень молюсків сягає в середньому до 7010 екз. м⁻² Аналіз показників чисельності Bivalvia та їх частки

у складі мейобентосу за різного кисневого режиму (табл. 3) показав, що за вмісту у воді кисню 1–4 мг/л їх кількість коливалася від 300,2 ± 248,0 екз.м⁻² до 960,0 ± 533,1 екз.м⁻² (частка у псевдомейобентосі – 14,6%). За вмісту розчиненого у воді кисню 5–7 О₂ мг/л їхня кількість коливалася від 835,0±314,5 екз. м⁻² до 1975,6±683,8 екз. м⁻² (частка в псевдомейобентосі – 17,6%). За вмісту розчиненого у воді кисню 8–11 О₂ мг/л їхня кількість коливалася від 2296,8 ± 819,0 екз. м⁻² до 10317,1 ± 4180,2 екз. м⁻² (частка в псевдомейобентосі – 39,8%). Молодь гастропод відмічалася нами за показників кисню 8 О₂ мг/л (397,0±174,2), та 9 О₂ мг/л (586±329 екз. м⁻², при 10 О₂ мг/л (204,4 ± 91,2 екз. м⁻²)

Висновки

Встановлено вплив основних екологічних факторів на формування чисельності молоді молюсків та їх частки від чисельності тимчасового компоненту та всього мейобентосу у північно-західній частині Чорного моря на прикладі Одеської затоки:

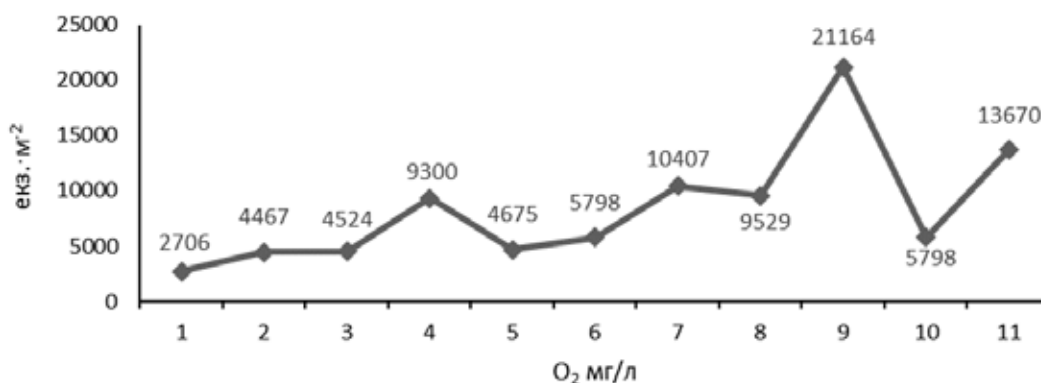


Рис. 2. Середні показники чисельності (екз. м⁻²) псевдомейобентосу при різних кисневих показниках (Одеський морський регіон)

Таблиця 3

Середні показники (екз. м⁻²) мітіллід за різних значень розчинного у воді кисню

Вміст розчиненого у воді кисню, мг/л	Щільність поселень, екз. м ⁻²	% від загального псевдомейобентосу	% від загального мейобентосу
0-1	300,0	13,5	0,1
2	828,5	18,5	0,28
3	960,0	21,2	1,9
4	529,2	5,6	0,33
5	835,0	17,9	0,38
6	940,9	16,2	0,39
7	1975,6	18,9	1,79
8	2296,8	24,1	1,01
9	9721,4	45,9	2,31
10	10317,1	50,2	2,23
11	5708,5	41,7	1,92

Найщільніші поселення двостулкових молюсків характерні для твердого субстрату, де їх частка як від тимчасового компоненту, так і в загальній чисельності мейобентосу найвища (41,8–46,0% та 10,8–12,0% відповідно).

Менші показники чисельності молоді молюсків у весняний період у порівнянні з літнім, що, найімовірніше, пояснюється

активним споживанням їх молоддю представників іхтіофауни.

Найменша щільність поселень двостулкових молюсків спостерігається за вмісту розчиненого у воді кисню від 1 до 4 мг/л (654,4 екз. м⁻²). Зростання щільності поселень досліджуваних гідробіонтів відбувалося за вмісту розчиненого у воді кисню 5–7 мг/л (у середньому 1250 екз. м⁻²).

Список використаної літератури

Воробйова Л.В. Північно-західна частина Чорного моря. Практична екологія морських регіонів. Чорне море. т. 8. Київ : Наукова думка, 1990. С. 196–200.

Воробйова Л.В. Мейобентос українського шельфу Чорного та Азовського морів. Київ : Наукова думка, 1999. 300 с.

Воробйова Л.В. Одеський морський регіон Чорного моря : гідробіологія пелагіалі та бенталі. Одеса : Астропринт, 2017. С. 4–10.

Воробйова Л.В., Таргонська О.А. Енергетична характеристика мейобентосу Жебріянської бухти. Екосистема узмор'я української дельти Дунаю. Одеса : Астропринт, 1998. С. 275–290.

Зайцев Ю.П. Літоральне зосередження живої речовини та пов'язані з нею екологічні проблеми сучасного Чорного моря. *Наукові записки Тернопільського педуніверситету. Серія: біологія.* 2005. № 4 (27). С. 383–390.

Нестерова Д.А., Теренько Л.М. Фітопланктон Одеського регіону в сучасних умовах. *Екологічна безпека прибережних та шельфових зон, комплексне використання ресурсів шельфу.* Севастополь, 2000. С. 383–390.

Giere G. Meiobenthology themicroscopic motile fauna of aquatic sediments. Berlin-Weidelberg : Springer-Verlag, 2009. 527 p.

Hulings G. Manual for the Study of Meiofauna. *Smithsonian Contributions to Zoology.* 1971. P. 78–84.

Nesterova D. State Environment of the Black Sea (2001–2007). The state of phytoplankton. Istanbul, Turkey. 2008. pp. 173–200.

Levin L., Gutiérrez D., Rathburn A., Neira C., Sellanes J., Muñoz P. Benthic processes on the Peru margin: a transect across the oxygen minimum zone during the 1997–98 El Niño. *Prog. Oceanogr.* 2002. № 53. P. 1–27. [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(02\)00022-8](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(02)00022-8).

McIntyre A.D., Murison D.J. The meiofauna of flatfish nursery ground. *Mar. Biol. Ass. U. K.* 1973. № 53. P. 93–118.

Scheltema R. The relationship of salinity to larval survival and development in *Nassarius obsoletus* (Gastropoda). *Biol. Bull.* 1965. № 129 (2). P. 340–354.

Sellanes J., Neira C. ENSO as a natural experiment to study meiofaunal communities. *Mar. Ecol.* 2006. № 27. P. 31–43. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485>.

Thiel H. Häufigkeit und Verteilung der Meiofauna im Bereich des Island-Faröer-Rückens. *Bereichte der Deutschen Wissenschaftlichen Kommission für Meeresforschung.* 1971. № 22. P. 99–128.

Thorson G. Parallel level-bottom communities, their temperature adaptation, and their “balance” between predators and food animals. *Perspectives in marine biology.* Berkeley, Los Angeles : Univ. Cal. press, 1958. P. 67–86.

Thorson G. Light as an ecological factor in the dispersal and settlement of larvae of marine bottom invertebrates. *Ophelia.* 1964. № 1. P. 167–208.

Thorson G. Some factors influencing the recruitment and establishment of marine benthic communities. *Netherl. J. Sea Res.* 1966. № 3 (2). P. 267–293.

Vorobyova L.V. The role of environmental factors in the formation of temporary meiofauna in the Odessa Sea Region of the Black Sea. *Scientific notes of Ternopil University. Biology series.* 2021. Vol. 81. № 1–2. P. 39–45.

Watzin M.S. The effects of meiofauna on settling macrofauna: meiofauna may structure macrofaunal properties communities. *Oecologia.* 1983. Vol. 59. P. 163–166.

Williams D.D. The brackish water hyporheic zone: invertebrate community structure across a novel ecotone. *Hydrobiologia.* 2003. № 510. P. 153–173.

Wilson T.R.S. Competition and predation in marine soft-sediment communities. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 1991. № 21. P. 221–241.

Yingst Y. Patternst of microfaunal fnd meiofaunal abundans in marine sediments measured with adenosine triphosphate assay. *Mar. Biol.* 1978. Vol. 47. № 1. P. 41–54.

References (translated & transliterated)

Vorobyova, L.V. (1990). Pivnichno-zakhidna chastyna Chornoho morya. Praktychna ekolohiya mors'kykh rehioniv. Chorne more [The northwestern part of the Black Sea. Practical ecology of marine regions. Black Sea]. Kyiv : Naukova dumka [in Ukrainian].

Vorobyova, L.V. (1999). Meyobentos ukrayins'koho shel'fu Chornoho ta Azovs'koho moriv [Meiobenthos of the Ukrainian shelf of the Black and Azov Seas]. Kyiv : Naukova dumka [in Ukrainian].

Vorobyova, L.V. (2017). Odeskyy morskyy rehion Chornoho morya : hidrobiolohiya pelahiali ta bentali [Odessa marine region of the Black Sea: hydrobiology of the pelagic and benthic zones]. Odesa : Astroprint [in Ukrainian].

Vorobyova, L.V., & Targonska, O.A. (1998). Enerhetychna kharakterystyka meyobentosu Zhebriyans'koyi bukhty. Ekosystema uzmor'ya ukrayins'koyi del'ty Dunayu [Energetic characteristics of meiobenthos of Zhebryan Bay. Coastal ecosystem of the Ukrainian Danube Delta]. Odesa : Astroprint [in Ukrainian].

Zaitsev, Yu.P. (2005). Litoralne zoseredzhennya zhyvoyi rehovyny ta pov'yazani z neyu ekolohichni problemy suchasnoho Chornoho morya [Littoral concentration of living matter and associated environmental problems of the modern Black Sea]. *Naukovi zapysky Ternopil's'koho peduniversytetu [Scientific notes of Ternopil Pedagogical University]*, 4 (27), 383–390 [in Ukrainian].

Nesterova, D.A., & Terenko, L.M. (2000). Fitoplankton Odes'koho rehionu v suchasnykh umovakh [Phytoplankton of the Odessa region in modern conditions]. *Ekolohichna bezpeka pryberezhnykh ta shel'fovykh zon, kompleksne vykorystannya resursiv shelfu [Ecological safety of castal and shelf zones, integrated use of shelf resources]*. Sevastopol [in Ukrainian].

Giere, G. (2009). Meiobenthology themicroscopic motile fauna of aguatic sediments. Berlin-Weidelberg : Springer-Verlag [in English].

Hulings, G. (1971). Manual for the Study of Meiofauna. *Smithsonian Contribs to Zoology* [in English].

Nesterova, D. (2008). State Environment of the Black Sea (2001–2007). The state of phytoplankton. Istanbul, Turkey [in English].

Levin, L., Gutiérrez, D., Rathburn, A., Neira, C., Sellanes, J., & Muñoz, P. (ed.) (2002). Benthic processes on the Peru margin: a transect across the oxygen minimum zone during the 1997–98 El Niño. *Prog. Oceanogr*, 53, 1–27 [in English].

McIntyre, A.D., & Murison, D.J. (1973). The meiofauna of flatfish nursery ground. *Mar. Biol. Ass. U. K.*, 53, 93–118 [in English].

Scheltema, R. (1965). The relationship of salinity to larval sarvival and development in *Nassarius obsoletus* (Gastropoda). *Biol. Bull.*, 129 (2), 340–354 [in English].

Sellanes, J., & Neira, C. (2006). ENSO as a natural experiment to study meiofaunal communities. *Mar. Ecol.*, 27, 31–43. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485> [in English].

Thiel, H. (1971). Haufigkeit und Verteilung der Meiofauna im Bereich des Island-Farøer-Rückens. *Bereichte der Deutschen Wissenschaftlichen Kommission für Meeresforschung*, 22, 99–128 [in English].

Thorson, G. (1958). Parallel level-bottom communities, their temperature adaptation, and their “balance” between predators and food animals. *Perspectives in marine biology*. Berkeley; Los Angeles : Univ. Cal. Press [in English].

Thorson, G. (1964). Light as an ecological factor in the dispersal and settlement of larvae of marine bottom invertebrates. *Ophelia*, 1, 167–208 [in English].

Thorson, G. (1966). Some factors influencing the recruitment and establishment of marine benthic communities. *Netherl. J. Sea Res*, 3 (2), 267–293 [in English].

Vorobyova, L.V. (2021). The role of environmental factors in the formation of temporary meiofauna of the Odessa Sea region of the Black Sea. *Scientific notes of Ternopil University. Biology series*, 81 (1–2), 39–45 [in English].

Watzin, M.S. (1983). The effects of meiofauna on settling macrofauna: meiofauna may structure macrofaunal properties communities. *Ecologia*, 59, 163–166 [in English].

Williams, D.D. (2003) The brackish water hyporheic zone: invertebrate community structure across a novel ecotone. *Hydrobiologia*, 510, 153–173 [in English].

Wilson, T.R.S (1991). Competition and predation in marine soft-sediment communities. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 21, 221–241 [in English].

Yingst, Y. (1978). Patternst of microfaunal and meiofaunal abundans in marine sediments measured with adenosine triphosphate assay. *Mar. Biol.*, 47 (1), 41–54 [in English].

Отримано: 26.04.2024

Прийнято: 07.05.2024



УДК 636.5:581.451.1/.5
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.4>

АНАТОМО-ГІСТОЛОГІЧНА БУДОВА ТА ОСОБЛИВОСТІ МОРФОМЕТРІЇ МОЗОЧКА СВІЙСЬКИХ ПТАХІВ

**Л. П. Горальський¹, І. М. Сокульський², Н. А. Колеснік³, Б. В. Гутий⁴,
Р. К. Романюк⁵, О. В. Павлюченко⁶, С. Ю. Шевчук⁷, Ю. В. Максименко⁸**

Актуальним питанням, що вимагає уваги у науковців – біологів, морфологів, є дослідження розвитку, росту і формування організму на органному і тканинному рівнях, зокрема органів цен-

¹ доктор ветеринарних наук, професор,
професор кафедри зоології, біологічного моніторингу та охорони природи
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: goralsky@ukr.net
ORCID: 0000-0002-4251-614X

² кандидат ветеринарних наук, доцент,
завідувач кафедри нормальної і патологічної морфології, гігієни та експертизи
(Поліський національний університет, м. Житомир)
e-mail: sokulskiy_1979@ukr.net
ORCID: 0000-0002-6237-0328

³ кандидат ветеринарних наук,
доцент кафедри нормальної і патологічної морфології, гігієни та експертизи
(Поліський національний університет, м. Житомир)
e-mail: natacha_kolesnik@ukr.net
ORCID: 0000-0001-7741-87530

⁴ доктор ветеринарних наук, професор, завідувач кафедри гігієни,
санітарії та загальної ветеринарної профілактики імені М.В. Демчука
(Львівський національний університет ветеринарної медицини та
біотехнологій імені С.З. Ґжицького, м. Львів)
e-mail: bvh@ukr.net
ORCID: 0000-0002-5971-8776

⁵ доктор педагогічних наук, кандидат біологічних наук, професор,
професор кафедри зоології, біологічного моніторингу та охорони природи
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: melnychenko.ruslana@gmail.com
ORCID: 0000-0002-6306-7427

⁶ кандидат біологічних наук, доцент,
завідувачка кафедри зоології, біологічного моніторингу та охорони природи
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: pavluchenkolessia@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2783-1037

тральної і периферичної нервової системи, яка займає суттєве місце у регуляції всіх процесів життєдіяльності живих організмів. Насамперед, цікавість до дослідження органів нервової системи зумовлена різними її характерними ознаками та фізіологічними особливостями: трансформацією, генерацією, сприйманням та передачею нервових імпульсів, збереженням енергії та інформації навколишнього середовища, здатністю нервової системи до збудження, гальмування, трофічної функції тощо. Зв'язок мозочка зі структурними відділами головного мозку та складна нейронна система обробки інформації, що надходить до його кори, роблять його унікальним за різноманітним виконуваним функціям. Мозочок є не лише центром координації рухів та рівноваги, але бере участь у регуляції багатьох інших функцій організму.

У статті подані результати досліджень анатомо-гістологічної будови та особливості морфометрії мозочка свійських птахів, які належать до підтипу хребетні тварини, класу Aves – птахи (*Gallus gallus, forma domestica L.*, 1758 – домашня курка, *Meleagris gallopavo forma domestica L.*, 1758 – індичка, *Anas platyrhynchos forma domestica L.*, 1758 – качка домашня, *Anser caerulescens forma domestica L.*, 1758 – гуска).

Морфологічні результати доповнюють та розширюють відомості макро- та мікроскопічної будови мозочка щодо видових особливостей свійських птахів у відповідні розділи порівняльної анатомії, гістології, судової ветеринарії, зоології тощо.

За результатами анатомічних досліджень мозочок у птахів міститься між великим та середнім мозком, дорсально від довгастого. Мозочок сформований тілом та двома правими і лівими боковими вушками. Поверхня органа представлена численними борознами, що ділиться на часточки, останні об'єднані у три частки: передню, середню та задню. У латеральній проекції мозочок трикутної форми, з вентрально видовженою вершиною. У досліджуваної свійської птиці, мозочок має загальні властивості його структурної будови та топографії, водночас відрізняється за морфометричними характеристиками. За органометрії, середня АМ мозочка у свійських птахів неоднозначна: більша у індиків ($1,987 \pm 0,0086$ г), менша у гусей ($1,409 \pm 0,0063$ г), потім у качок ($0,932 \pm 0,0041$) та найменша у курей, що становить відповідно – $0,516 \pm 0,0032$ г.

Середній показник ВМ маси мозочка має пряму синхронну залежність, стосовно з його АМ та маси тіла тварин, і становить відповідно $0,047 \pm 0,0002$ % у індиків, $0,041 \pm 0,0002$ % у гусей, $0,036 \pm 0,0002$ % у качок та $0,023 \pm 0,0001$ % у курей. Мікроскопічна будова мозочка свійських птахів має подібну структурну організацію: на поперечному зрізі чітко диференціюється сіра (кора) та біла речовинами. Структурна організація кори мозочка птахів сформована трьома шарами (молекулярний, гангліонарний, зернистий), неоднозначної товщини та різноманітною популяцією нервових клітин, які мають зумовлений взаємозв'язок між морфофункціональним станом нейронів та іннервованих структур, відповідно з відомими особливостями тварин.

Ключові слова: анатомо гістологічна структура, видова особливість, морфометрія, органометрія, нервова система, органи, структурна організація, хребетні тварини.

ANATOMO-HISTOLOGICAL STRUCTURE AND MORPHOMETRIC FEATURES OF THE CEREBELLUM OF DOMESTIC BIRDS

L. P. Horalskyi, I. M. Sokulskiy, N. L. Kolesnik, B. V. Gutyj, R. K. Romaniuk, O. V. Pavliuchenko, S. Y. Shevchuk, Y. V. Maksymenko

An urgent issue that requires the attention of scientists – biologists, morphologists – is the study of the development, growth and formation of parameters of the structural features of organs and tissues, in particular, organs of the central and peripheral nervous system, which occupies a significant place in the regulation of all vital processes of living organisms. Special interest in the study of the organs of the nervous system is due to its various properties and functions: perception and conduction

⁷ кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри зоології, біологічного моніторингу та охорони природи
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: dzhgutyk@ukr.net
ORCID: 0000-0001-6374-1859

⁸ кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри зоології, біологічного моніторингу та охорони природи
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: maksymenko8888@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5292-852X

of nerve impulses, generation, transformation, storage of energy of various types and information of the external environment, ability of the nervous system to excite, inhibit, trophic function, etc. The connection of the cerebellum with the structural parts of the brain and the complex neural system of processing information coming to its cortex make it unique in terms of the variety of functions it performs. The cerebellum is not only the center of coordination of movements and balance, but also participates in the regulation of many other functions of the body. The article presents the results of studies of the anatomico-histological structure and morphometric features of the cerebellum of domestic birds belonging to the vertebrate subtype, class Aves – birds (*Gallus gallus*, forma domestica L., 1758 – domestic chicken, *Meleaguis gallopavo* forma domestica L., 1758 – turkey, *Anas platyrhynchos* forma domestica L., 1758 – domestic duck, *Anser caerulescens* forma domestica L., 1758 – goose). The morphological results complement and expand the information on the macro- and microscopic structure of the cerebellum in relation to the species characteristics of domestic birds in the relevant sections of comparative anatomy, histology, forensic veterinary medicine, zoology, etc.

According to the results of anatomical studies, the cerebellum in birds is located between the cerebrum and midbrain, dorsal to the medulla oblongata. The cerebellum is formed by the body and two right and left lateral ears. The surface of the organ is represented by numerous furrows, which are divided into lobes, the latter united into three lobes: front, middle and back. In the lateral projection, the cerebellum is triangular in shape, with a ventrally elongated apex. In the birds studied by us, the cerebellum is characterized by the general principles of its structural organization and morphotopography, but differs in its organometric indicators. According to organometry, the absolute mass of the cerebellum in poultry is different: the largest in turkeys is 1.987 ± 0.0086 g, the smallest in geese is 1.409 ± 0.0063 g, then in ducks is 0.932 ± 0.0041 g and the smallest in chickens, which is 0.516 ± 0.0032 g. The relative mass of the cerebellum changes synchronously with the absolute mass and is $0.047 \pm 0.0002\%$ in turkeys, 0.041 ± 0.0002 in geese, 0.036 ± 0.0002 in ducks, $0.023 \pm 0.0001\%$ in chickens. The microscopic structure of the cerebellum of domestic birds has a similar structural organization: gray (cortex) and white matter are clearly differentiated on a cross section. The cerebellar cortex of birds is formed by corresponding layers (molecular, ganglionic, granular), of different thicknesses and is characterized by an unequal population of neurons, which have a determined relationship between the level of the morphofunctional state of nervous and innervated structures depending on the animal species.

Key words: anatomico-histological structure, species feature, morphometry, organometry, nervous system, organs, structural organization, vertebrates.

Вступ

Нервова система забезпечує взаємозв'язок організму з навколишнім середовищем (Sokulskyi et al., 2021). Вона є однією із важливих систем організму, яка спільно з ендокринною і серцево-судинною системами, інтегрує у єдине ціле живі організми, забезпечуючи їх взаємозв'язок із внутрішнім і зовнішнім середовищем (Grechukha & Otych, 2020). Органи нервової системи координують та регулюють крово- і лімфообіг, обмінні процеси, які, зі свого боку, мають вагомий вплив на морфофункціональну діяльність органів нервової системи (Garman, 2011; Shnurenko et al., 2020). Нервова система організму людини і тварин сприймає різноманітну інформацію, яка потрапляє із зовнішнього середовища і внутрішніх органів. Вона здійснює аналіз інформації, вибирає та координує функції організму, генерує сигнали, які забезпечують відповідні реакції, адекватно до діючих подразників (Dehtyarenko, 2018).

Останнім часом проведено багато досліджень щодо макро-, мікроскопічної будови та розвитку органів нервової системи у тва-

рин та мозочка, зокрема у процесі філогенетичного розвитку (Smaers et al., 2018), онтогенезі (Amore et al., 2021), експерименті (Ramezani et al., 2012; Voogd, 2012; Zhang, 2016). Водночас гісто- та цитометрична оцінка органа у хребетних тварин класу «Птахи», їх порівняльний аналіз, неповно висвітлено у наукових джерелах.

Матеріал і методи

Для проведення досліджень відбирали мозочок від клінічно здорових, статевозрілих свійських тварини, які належали до підтипу хребетних тварин, класу Aves – птахи (*Gallus gallus*, forma domestica L., 1758 – домашня курка, *Meleaguis gallopavo* forma domestica L., 1758 – індичка, *Anas platyrhynchos* forma domestica L., 1758 – качка домашня, *Anser caerulescens* forma domestica L., 1758 – гуска). Дослідні тварини підбирали з урахуванням віку. Дослідження здійснювали у співпраці співробітників кафедр нормальної і патологічної морфології, гігієни та експертизи (Поліський національний університет) та кафедр зоології, біологічного моніторингу та охорони природи (Житомирський державний університет імені Івана Франка).

Дослідження проведені з дотриманням правил щодо лабораторної практики GLP (1981 р.) та положень «Загальних етичних принципів експериментів на тваринах», які затверджені першим Національним конгресом з біоетики (м. Київ, 2001 р.). Експериментальні дослідження здійснені згідно вимог міжнародних принципів «Європейської конвенції захисту хребетних тварин, що використовують в експерименті та інших наукових цілях» (European Convention, 1986) та Закону України «Про захист тварин від жорстокого поводження» (№ 3447-IV від 21.02.2006 р., м. Київ).

У роботі застосовували такі методи досліджень: клінічні – для характеристики клінічного стану птиці; зоотехнічні – для визначення загальної маси тіла тварин та абсолютної маси органа; мікроскопічні – для дослідження гісто- та цитоархітекtonіки органа; нейрогістологічні – для виявлення нейрофібрилярного апарату та хроматофільної речовини у нейроцитах); морфометричні – для встановлення абсолютних та відносних характеристик мозочка; статистичні – для обробки цифрових даних. Для дослідження АМ мозочка, відпрепарований орган, відразу після забою тварин, зважували, використовуючи при цьому електронні ваги RADWAG PS-1200 з точністю до 0,1 г. Проміри мозочка проводили за допомогою штангенциркуля з точністю до 0,1 мм.

З метою проведення мікроскопічних досліджень, відібрані шматочки матеріалу піддавали фіксації у 12%-му охолоджену водному розчині нейтрального формаліну і рідині Карнуа. Потім штаточки мозочка заливали у тверде середовище (парафін) згідно схемам, запропонованих у посібнику (Goralskiy et al., 2019). Гістологічні зрізи товщиною до 8–10 мкм робили за допомогою санного мікротома – МС-2.

З метою дослідження детальної будови мозочка, його гісто- та цитоархітекtonіки, гісто- та цитометричних характеристик проводили виготовлення серійних парафінових зрізів з їх наступним, після депарафінації, фарбуванням гематоксином і еозином.

Цитоархітекtonіку органа у свійських птахів (форму клітин та їх клітинну типізацію, нейрофібрилярний апарат, характер галуження відростків (аксонів, дендритів) досліджували на гістопрепаратах імпрегованих азотнокислим сріблом (Goralskiy et al., 2019).

Отримання об'єктивних цифрових даних структурних компонентів мозочка у свійських птахів (виміри лінійних характеристик органа, об'єму нейроцитів, їх ядер, товщини молекулярного, гангліонарного, зернистого шарів кори мозочка), здійснювали окуляр-мікрометром, використовуючи морфометричні та статистичні методи досліджень.

Результати та обговорення

Птахи є одним з найбільш численних у видовому відношенні класів вищих хребетних тварин. Птахи – це гомойотермні організми, що отримали в результаті перетворення передніх кінцівок на крила здатність до польоту (Melnyk & Melnyk, 2017).

Пристаювання птахів до польоту сильно позначилося на будові їх тіла та життєвих систем організму. В еволюційному плані відбулися значні зміни, зокрема, у будові інтегруючих органів. У птахів, нервова система досягає значно високого ступеню розвитку та диференціації (Kang, 2021). Мозочок птахів, особливо у папуг та дятлів, порівняно з мозочком інших хребетних тварин, значно великий (Sultan, 2005). Нещодавно, шляхом застосування методу, який дозволяє імуноцитохімічно ідентифікувати ядра нейронів (Herculano-Houzel et al., 2005), вдалося з'ясувати, що за рівної маси мозку у хребетних тварин, кількість нейронів у головному мозку птахів більша, ніж у ссавців. У мозку птахів міститься майже у двічі більше нейронів, ніж у мозку ссавців за рівної його маси (Olkowicz et al., 2016), нервові клітини у мозку птахів розміщені щільніше.

У досліджуваних нами птахів, мозочок вкриває ромбоподібну ямку. Знаходиться орган у ділянці між великим та середнім мозком, вище довгастого мозку. Макроскопічна будова мозочка утворена сильно вираженою частиною – тілом (черв'ячком) і двома малими бічними придатками, у вигляді слабовиражених бічних вушок. Тіло мозочка на його поверхні, поперечними борознами поділено на часточки.

Головний мозок птиці за аналогією з ссавцями поділяється на великий та ромбоподібний (Watanabe et al., 2021). Мозок у птахів на відміну від плазунів отримує сильний розвиток (Marugán-Lobón et al., 2016).

У курей мозочок розміщений між великим та середнім мозком, зверху від довгастого. Черв'ячок (тіло) мозочка, поперечними щілинами розділено на частки та має два виражені бокові вушка (рис. 1). Основа мозочка витягнута і вигнута рострально. Збоку мозо-

чок має округлий вигляд і за формою нагадує грудкоподібну структуру, сильно розширену біля півкуль великого мозку і значно звужену на межі його з продовгуватим мозком. У курей, вушка мозочка, у вигляді конусоподібних структур, виступають по обидва боки розширеної нижньої його ділянки (див. рис. 1). Поверхня мозочка у курей розділена щілинами на листки (звивини), що формують часточки, а ті, у свою чергу, – частки мозочка (рис. 2).

Мозочок індички, знаходиться між великим та середнім мозком, дорсально від довгастого. Його більшу частину складає середня частка – черв'як з характерними поперечними борознами. Бічні частки мозочка слабо розвинуті і виступають у вигляді вушкоподібних виростів. Мозочок досягає значних розмірів, має округлу форму і значно потовщений у ділянках, звідки виступають вушкоподібні вирости. У каудальному напрямку він звужується (рис. 3). Поверхня мозочка має виражені щілини, які поділяють її на частки (рис. 4).

Мозочок качки розташований дорсально від довгастого мозку – між великим та середнім мозком. Мозочок має розвинуте тіло та два бокові вушка – праве і ліве (рис. 5). У боковій проекції мозочок має форму трикутника, з вентрально видовженою вершиною. Поверхня мозочка численними борознами поділена на десять часточок, які об'єднуються у три частки: передню, середню і задню (рис. 6).

У гуски мозочок повністю вкриває ромбоподібну ямку і займає ділянку між великим

та середнім мозком, дорсальніше від довгастого. Мозочок гуски побудований із масивної частини – тіла (черв'яка) та двох маленьких бокових придатків у вигляді слабо розвинутих бокових вушок (рис. 7). На поверхні тіло мозочка поперечними борознами поділено на багаточисленні часточки (рис. 8).

Вирішальне значення у морфологічних дослідженнях належить органометрії, яка дозволяє ретельно провести аналіз кількісних показників щодо структурної характеристики організму тварин у процесі його онто- і філогенетичного розвитку і за дії на живі організми різних чинників довкілля (Krstev, 2007).

Проведені нами органометричні дослідження свідчать, що абсолютна маса мозочка у свійської птиці, має пряму залежність щодо видових їх особливостей: найбільша виявляється у індичок ($1,987 \pm 0,0086$ г), порівняно з курми, абсолютна маса мозочка достовірно ($P < 0,001$) збільшується у 3,8 рази. Абсолютна маса мозочка у гуски дорівнює $1,409 \pm 0,0063$ г, що достовірно ($p < 0,001$) у 1,5 рази більше, ніж у качки. Водночас, порівняно з наземними птахами, абсолютна маса органа у гуски, у 2,73 рази більша, ніж у курки, але є меншою в 1,4 рази ніж у індички (рис. 9).

Середній показник ВМ мозочка у досліджуваної птиці змінюється синхронно та є прямопропорційним абсолютній масі органа та масі тіла тварин. Так, згідно органометричних досліджень, відносна маса мозочка, так само, як і його абсолютна маса,



Рис. 1. Макроскопічна будова мозочка курки: а – півкулі великого мозку; б – мозочок; в – тіло (черв'як) мозочка; г – вушка мозочка. Макропрепарат

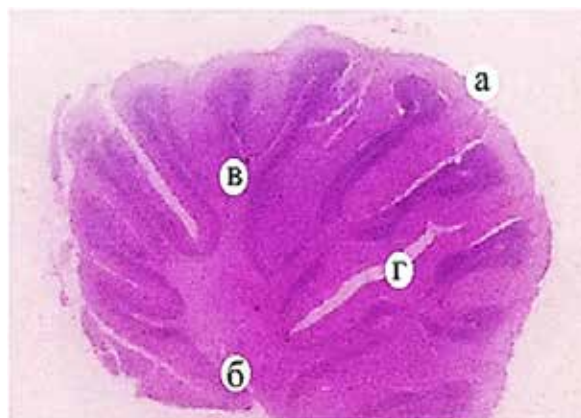


Рис. 2. Будова мозочка курки (фронтальний зріз): а – сіра речовина; б – біла речовина; в – звивини сірої речовини; г – щілини (борозни) кори мозочка. Гематоксилін та еозин. $\times 10$

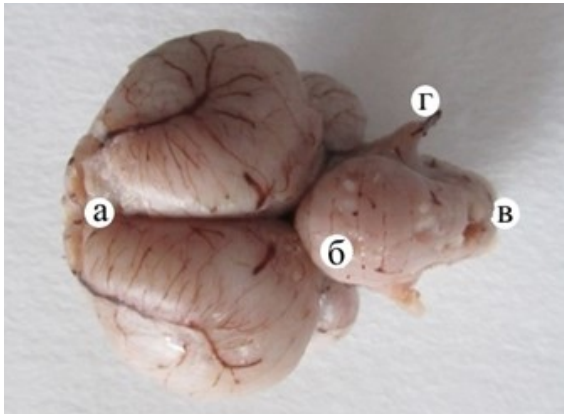


Рис. 3. Макроскопічна будова мозочка індички: а – півкулі великого мозку; б – мозочок; в – тіло (черв'як) мозочка; г – вушка мозочка. Макропрепарат

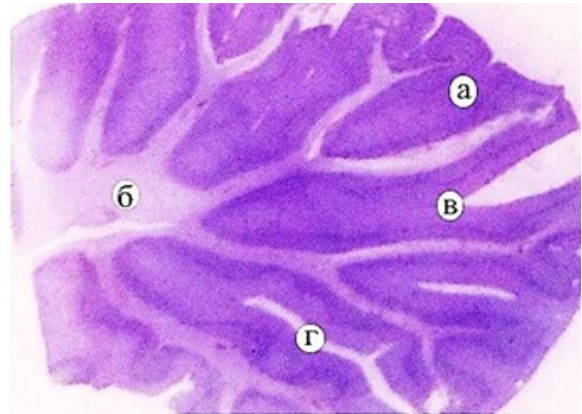


Рис. 4. Будова мозочка індички (фронтальний зріз): а – сіра речовина; б – біла речовина; в – звивини сірої речовини; г – щілини (борозни) кори мозочка. Гематоксилін та еозин. × 10



Рис. 5. Макроскопічна будова мозочка качки: а – півкулі великого мозку; б – мозочок; в – тіло (черв'як) мозочка; г – вушка мозочка. Макропрепарат

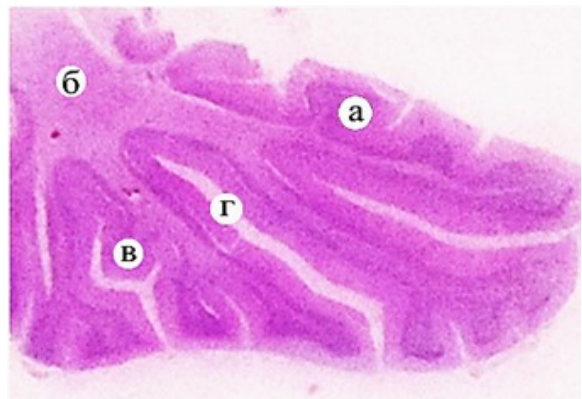


Рис. 6. Будова мозочка качки (фронтальний зріз): а – сіра речовина; б – біла речовина; в – звивини сірої речовини; г – щілини (борозни) кори мозочка. Гематоксилін та еозин. × 10

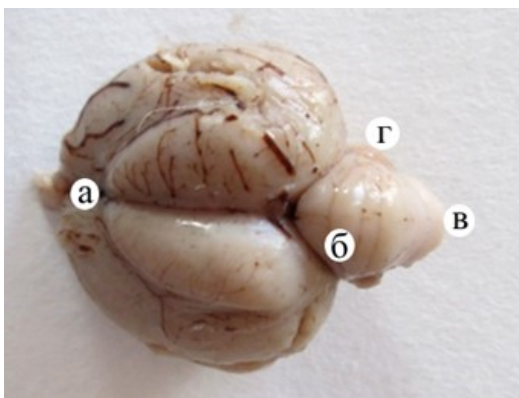


Рис. 7. Макроскопічна будова мозочка гуски: а – півкулі великого мозку; б – мозочок; в – тіло (черв'як) мозочка; г – вушка мозочка. Макропрепарат

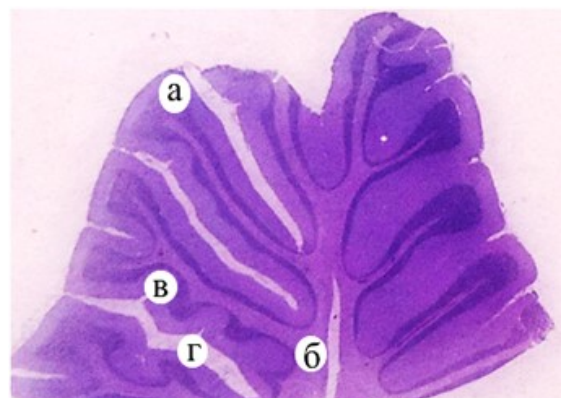


Рис. 8. Будова мозочка гуски (фронтальний зріз): а – сіра речовина; б – біла речовина; в – звивини сірої речовини; г – щілини (борозни) кори мозочка. Гематоксилін та еозин. × 10

значно більшою виявляється у індичок, дещо меншою у гуски, качки та найменшою у курки (рис. 10). При тім у наземної птиці, у індичок, порівняно із курми, відносна маса мозочка вірогідно ($P < 0,01$) зростає у два рази і дорівнює відповідно $0,047 \pm 0,0002\%$. Середній показник ВМ мозочка у водоплавної птиці, у гуски, порівняно з наземними птахами, у 1,15 рази поступається індичці та є достовірно ($p < 0,01$) у 1,8 рази більшою порівняно з куркою (див. рис. 10).

Разом із неоднозначними середніми показниками АМ і ВМ мозочка у свійської птиці, залежно від їх видових особливостей, відбуваються прямопропорційні зміни його лінійних характеристик: довжини, ширини та висоти (Agashiwala et al., 2008). Так, довжина мозочка водоплавних птахів, а саме у гуски ($15,6 \pm 0,042$ мм), достовірно ($p < 0,01$) у 1,26 рази менша, ніж такий показник у качки і на 2,0 мм менша щодо індички та, навпаки, є на 0,8 мм більшою, стосовно курки (рис. 11). Характерні особливості щодо лінійних промірів, виявлені нами щодо ширини мозочка, яка у гуски у 1,34 рази достовірно ($p < 0,01$) більша, ніж у качки та дорівнює $12,9 \pm 0,022$ мм. У водоплавних птахів, порівняно з наземними, ширина органа у гуски на 6,0 мм більша ніж

у курки та на 1,15 мм ніж у індички (див. рис. 5). Подібні морфометричні зміни спостерігали і стосовно лінійних показників, щодо висоти органа. Так, найбільшу висоту мозочка ($13,2 \pm 0,024$ мм) виявили у гуски, середній показник ($11,2 \pm 0,024$ мм) у індички та наблизений до відповідного у качки ($9,6 \pm 0,02$ мм) і найменший ($7,4 \pm 0,014$ мм) у курки (рис. 11).

Відповідно з результатами гістологічних досліджень, мозочок досліджуваної птиці, має подібну гістоархітектуру. На поперечному зрізі він сформований сірою і білою речовинами. Його сіра речовина знаходиться поверхнево, формуючи кору мозочка, біла речовина – розташована у центрі органа (рис. 12).

У сірій речовині мозочка диференціюють наступні шари: зовнішній (молекулярний), середній (гангліонарний), внутрішній (зернистий), які мають подібну цитоархітектонічну будову, властиву для свійських тварин (рис. 13) Кожний із шарів кори мозочка представлений чітко певними нейронами.

Молекулярний шар кори мозочка містить кошикові та зірчасті форми (зірчасті) нервові клітини, які представляють єдину систему нервових клітин, що передають гальмівні нервові імпульси на ден-



Рис. 9. Абсолютна маса мозочка свійських птахів (г)

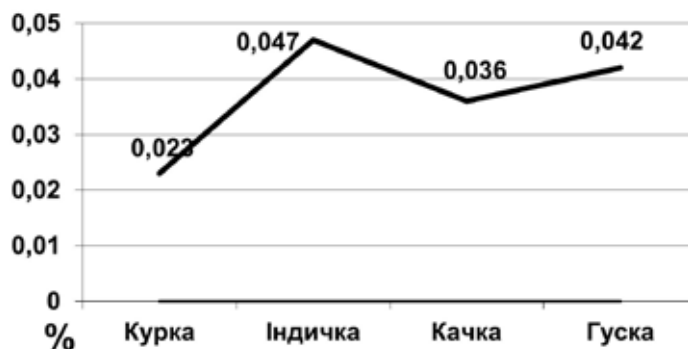


Рис. 10. Відносна маса мозочка свійських птахів (%)

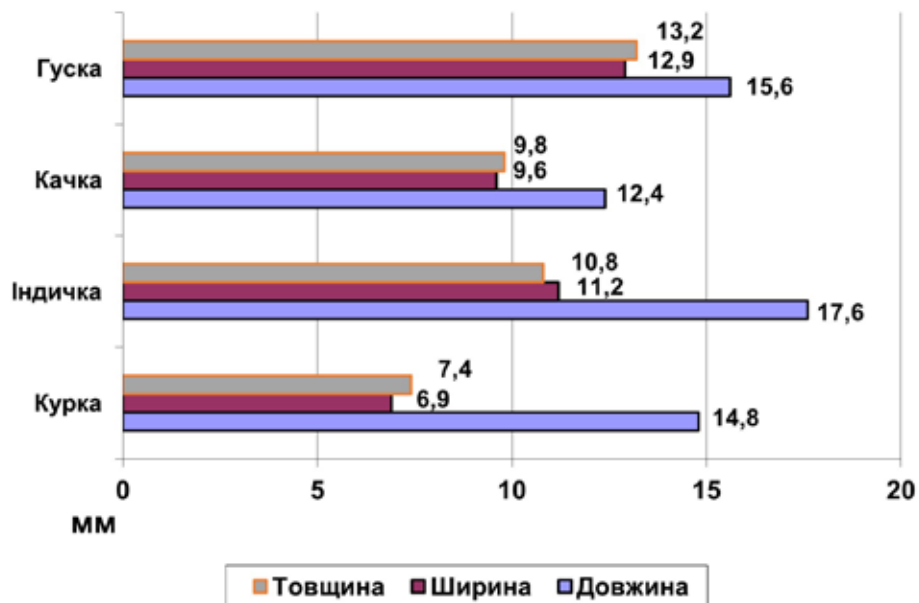


Рис. 11. Органометричні показники мозочка свійських птахів

дрити і тіла клітин Пуркінє. Кошикові нейрони знаходяться над клітинами Пуркінє у гангліонарному шарі. Такі клітини мають невеликі розміри, вони неправильної форми з великою кількістю відростків.

Гангліонарний шар кори мозочка утворений великими, грушоподібної форми нервовими клітинами – Пуркінє, які розміщені однорядно та вертикально звивинам мозочка (рис. 14). Тому, форма таких клітин у площині, через яку прямують дендрити, грушоподібна, а у перпендикуляр-

ній площині – веретеноподібна. Нервові клітини – Пуркінє, характеризуються чітко розвиненим деревом дендритів. Це ефекторні нейрони мозочка, які через його ядра передають нервові імпульси у низхідні провідні шляхи, що з'єднують головний мозок зі спинним (Kim et al., 2012). Нервові клітини Пуркінє, характеризуються чітко вираженим ядром та чітко вираженою нейроплазмою. За розміром, вони найбільші з усієї цитопопуляції нейронів кори мозочка. Їх морфофункціональна активність та розміри, щільність

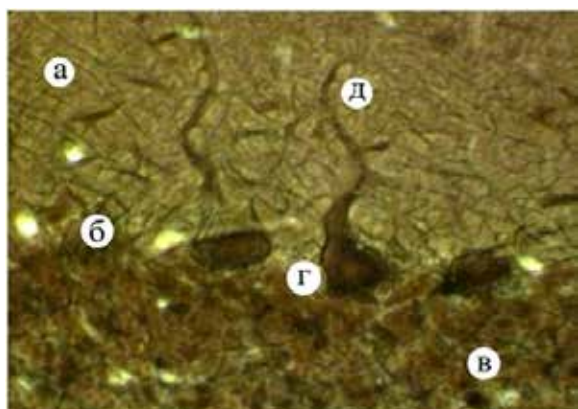


Рис. 12. Фрагмент мікроскопічної будови кори мозочка курки: а – молекулярний шар; б – гангліонарний шар; в – зернистий шар; г – клітини Пуркінє; д – дендрит. Більшовський-Грос. × 320

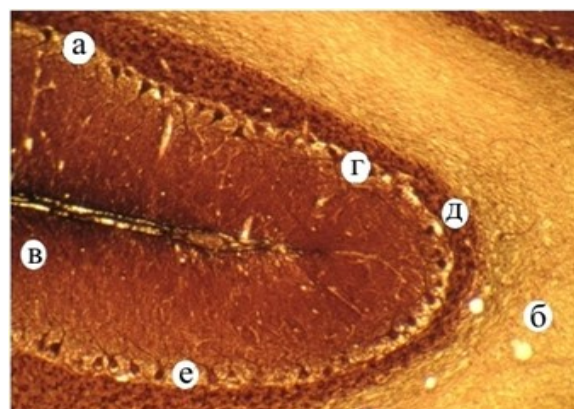


Рис. 13. Фрагмент мікроскопічної будови кори мозочка індички: а – сіра речовина; б – біла речовина; в – молекулярний шар; г – гангліонарний шар; д – зернистий шар; е – клітини Пуркінє. Більшовський-Грос. × 280

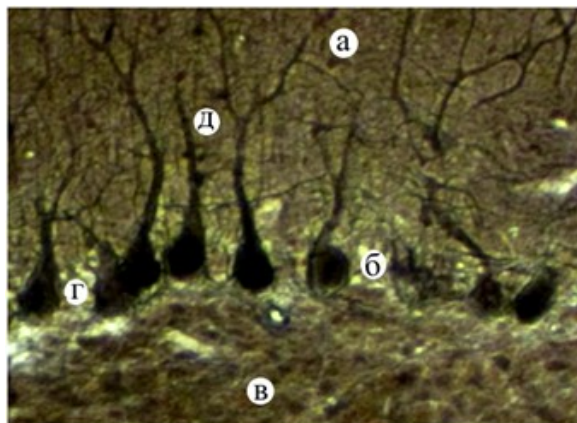


Рис. 14. Фрагмент мікроскопічної будови кори мозочка гуски: а – молекулярний шар; б – гангліонарний шар; в – зернистий шар; г – клітини Пуркінє (грушоподібні); д – дендрити клітин Пуркінє. Більшовський-Грос. × 320

розташування тощо у значній мірі мають пряму залежність щодо передачі нервових імпульсів і регулюються відповідно координації рухових процесів, залежно від видових особливостей та класу тварин (Нохна et al., 2018).

Цитометричними дослідженнями та за результатами математичного аналізу, вста-

новлено різні об'єми клітин Пуркінє та відповідно їх ядер. При тім виявлено, різний їх середній показник ЯЦВ, стосовно видових особливостей свійських птахів. Це не випадково, оскільки математичний аналіз структур морфологічних об'єктів одержав визнання як метод, що відрізняється об'єктивністю та достовірністю (Rajković et al., 2016).

Так, за результатами наших підрахунків, об'єм клітин Пуркінє у гангліонарному шарі мозочка гуски у 1,15 рази більший ніж у качки. Порівнюючи із наземною птицею, існує тенденція до незначного зменшення стосовно індички та зростання ($P < 0,01$) у 1,8 рази щодо курки (рис. 15). При тім об'єм ядер у клітинах Пуркінє досліджуваної птиці майже не змінюється (рис. 16) і, тому, їх ядерно-цитоплазматичне відношення різне, яке є основним морфометричним показником рівня метаболічних процесів та диференціації клітин у тварин, залежно від умов їх існування.

Вивчення морфометричних характеристик, а саме ядерно-цитоплазматичного відношення в соматичних клітинах, являється наочним показником, чутливим до різноманітних патологічних порушень у клітинах, завдяки якого можна характеризувати структурно-функціональний їх стан (Cherniavskiy, 2019).

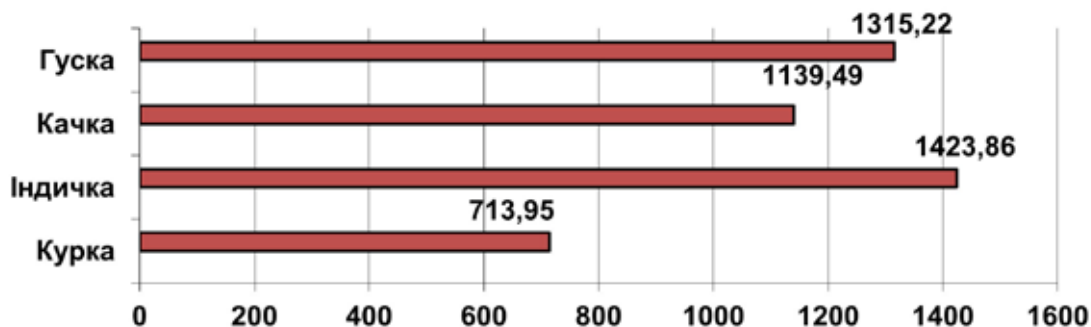


Рис. 15. Об'єм перикаріонів нервових клітин Пуркінє у свійських птахів (мкм³)

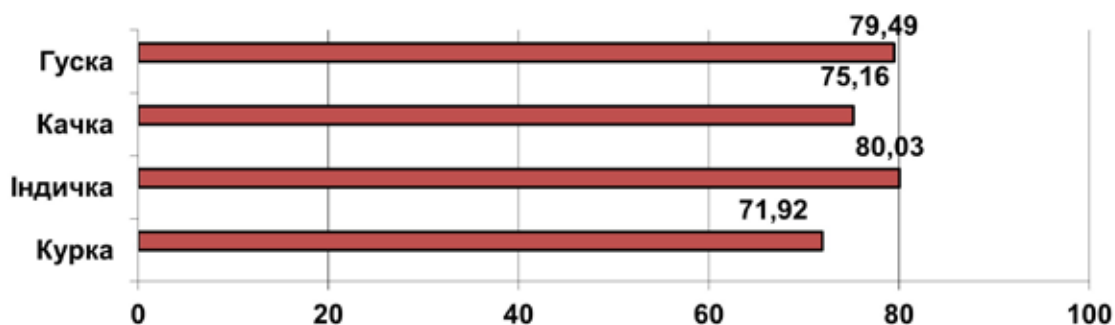


Рис. 16. Об'єм ядер нервових клітин Пуркінє у свійських птахів (мкм³)

За результатами наших досліджень, відповідно до показників середнього об'єму клітин Пуркінє та відповідно ядер, їх ЯЦВ неоднозначне (рис. 17). Притому, значно більший показник ЯЦВ виявили у нервових клітин гуски – $0,079 \pm 0,013$, подібним значення ядерно-цитоплазматичного відношення було у качки ($0,087 \pm 0,013$) та індички ($0,083 \pm 0,024$) і достовірно ($P < 0,001$) у 1,75 раза меншим у курки. Це пояснюється біологічними особливостями птахів та свідчить про морфофункціональний стан нервових клітин, розвиток у них білоксинтезувального апарату, стан метаболічних процесів тощо, пов'язаних з індивідуальними і видовими особливостями дослідних птахів.

Окрім того, за результатами проведених нами морфометричних досліджень

встановлено, що гістометричні характеристики товщини гістоархітектонічних шарів мозочка у наземних птахів, подібні до таких як у водоплавної птиці (рис. 18).

У цьому випадку, середній показник товщини кори мозочка з досліджуваної птиці, більший у індички – $404,25 \pm 5,76$ мкм, майже подібний у гуски – $399,7 \pm 5,46$ мкм, проміжне значення у качки – $376,29 \pm 5,34$ мкм і найменший у курки ($350,7 \pm 12,68$ мкм).

Подібність та аналогічність спостерігали і щодо перерозподілу тканинних компонентів гістоархітектонічних шарів (молекулярного, гангліонарного, зернистого) органа у свійських птахів. При тім, середній показник товщини молекулярного шару мозочка у досліджуваної нами птиці корелює зі товщиною кори мозочка та найбільшим

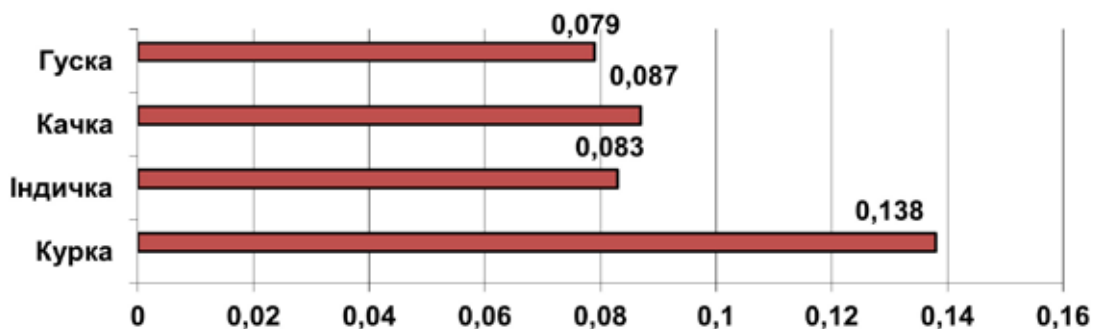


Рис. 17. Ядерно-цитоплазматичне відношення клітин Пуркінє свійських птахів

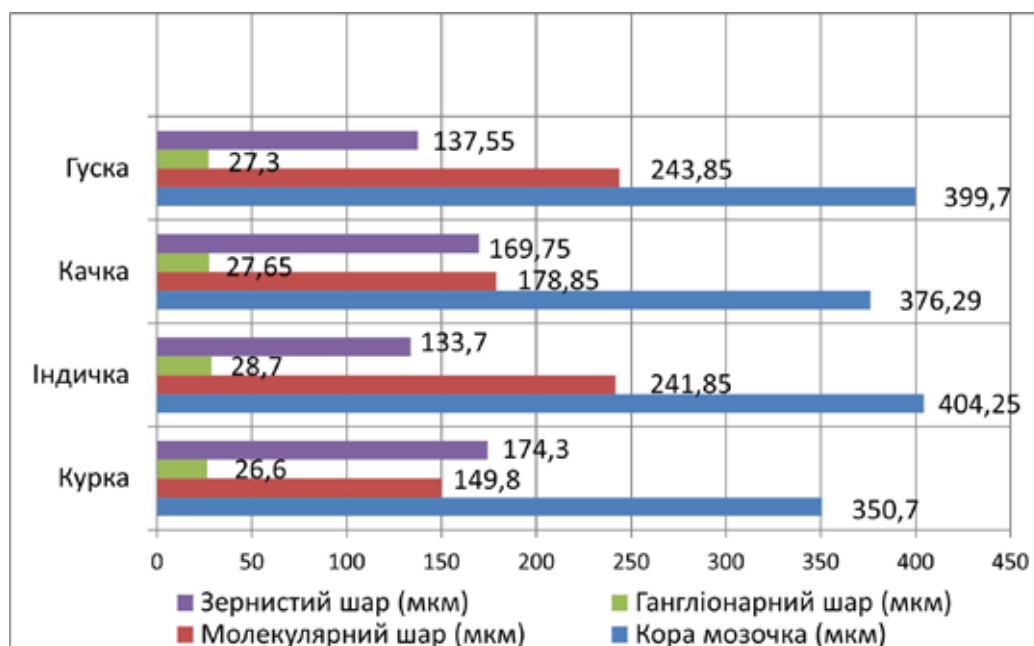


Рис. 18. Морфометричні показники структурних компонентів товщини гістоархітектонічних шарів мозочка свійських птахів

є у індички ($241,85 \pm 2,35$ мкм), дещо меншим у гуски ($234,85 \pm 2,43$ мкм), потім у качки ($178,85 \pm 4,30$ мкм) та найменшим відповідно, у курки ($149,80 \pm 6,27$ мкм). Разом з тим, показник середньої товщини гангліонарного шару мозочка у наземної та водоплавної птиці був подібним і мав найменші виміри, порівняно з усіма гістоархітектонічними шарами мозочка (див. рис. 18).

За таких показників, зміни вимірів товщини виявляли у зернистих шарах кори мозочка, у бік зростання у курей ($174,30 \pm 5,74$ мкм) та качки ($169,75 \pm 4,43$ мкм) і, відповідно, у бік зниження у індички ($133,70 \pm 2,92$ мкм) та гуски ($137,55 \pm 2,45$ мкм) (див. рис. 18).

Висновки

Морфологія, морфотопографія, варіабельність органометричних вагових (абсолютна та відносна маси), лінійних (довжина, ширина, висота) величин мозочка, його цито- (об'єм клітин Пуркінє) та гістометричних (товщина кори мозочка) параметрів у представників класу птахи залежить від їх рухової активності, умов та визначається певним видом представників класу птахи:

– знаходиться мозочок дорсально від довгастого мозку у ділянці між великим та середнім мозком. Він сформований тілом та правим і лівим боковими вушками. На поверхні мозочок численними борознами поділений на часточки: передню, середню та задню. У боковій проекції мозочок свійських птахів трикутної форми, з вентрально вивоженою вершиною.

– середня АМ мозочка свійських птахів має різні значення: більша у індички

$-1,987 \pm 0,0086$ г), дещо менша у гуски $-1,409 \pm 0,0063$ г, потім у качки $-0,932 \pm 0,0041$ г і значно менша у курки $-0,516 \pm 0,0032$ г. Середній показник відносної маси мозочка змінюється синхронно з абсолютною масою та відповідно дорівнює: у індички $-0,047 \pm 0,0002\%$; у гуски $-0,041 \pm 0,0002$; у качки $-0,036 \pm 0,0002$; у курки $-0,023 \pm 0,0001\%$.

– мозочок свійської птиці має подібну структурну організацію: на поперечному зрізі утворений білою та сірою речовиною, яка сформована молекулярним, гангліонарним і зернистим шарами, які характеризуються різною популяцією нервових клітин.

– товщина кори мозочка класу птахи різна: у курей $-350,7 \pm 12,68$ мкм, індиків $-404,25 \pm 5,76$, качок $-376,29 \pm 5,34$, гусей $-234,85 \pm 2,43$ мкм. Найбільша товщина його гістоархітектонічних шарів у всіх досліджуваних тварин властива зернистому шару, дещо менша – у молекулярному і найменша – у гангліонарному.

– у порівняльно-анатомічному ряді свійських птахів встановлено різні об'єми перикаріонів клітин Пуркінє: найменші об'єми у представників класу птахи – кури ($713,95 \pm 68,58$ мкм³); дещо більша у качки ($1139,49 \pm 88,79$ мкм³); гуси ($1315,22 \pm 88,53$ мкм³); індики ($1423,86 \pm 81,60$ мкм³).

– середній показник ЯЦВ клітин Пуркінє, який свідчить про їх функціональну активність має різні значення: найбільший у гуски $-0,079 \pm 0,013$, наближене значення у качки $-0,087 \pm 0,013$ та індички $-0,083 \pm 0,024$ і достовірно ($P < 0,001$) менше у 1,75 раза у курки.

Список використаної літератури

Горальський А.П., Хомич В.Т., Кононський О.І. Основи гістологічної техніки і морфофункціональні методи дослідження у нормі та при патології : навч. посіб. Житомир : Полісся, 2019. 288 с.

Гречуха В., Отич Д. Вплив нейропластичності нервової системи на розвиток особистості у підлітковому віці. *Науковий часопис НПУ імені М.П. Драгоманова. Серія 12. Психологічні науки*. 2020. № 11 (56). С. 48–56. [https://doi.org/10.31392/NPU-nc.series12.2020.11\(56\).04](https://doi.org/10.31392/NPU-nc.series12.2020.11(56).04).

Дегтяренко Т.В. Онтологія визначення основних властивостей нервової системи людини в концепті розробки проблеми індивідуальності. *Український журнал медицини, біології та спорту*. 2018. Том 3. № 5 (14). С. 14–18. <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2020-92-7-14-18>.

Європейська конвенція про захист домашніх тварин» від 13.11.1987 р., що ратифіковано: Законом України № 578-VII (578-18) від 18.09.2013. [Електронний ресурс]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_a15#Text (дата звернення 03.02.2024).

Закон України. Про захист тварин від жорстокого поводження (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2006, № 27, ст. 230). [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3447-15#Text> (дата звернення 05.02.2024).

Карунський О.Й., Макаринська А.В., Севастьянов О.В. Динаміка показників крові курчат при використанні ферментного препарату “Клерізім гранульований” в їх годівлі. Зернові продукти і комбікорми. 2018. Том 18. № 2. С. 35–39. <https://doi.org/10.15673/gpmf.v18i2.953>.

Мельник О.О., Мельник М.В. Біоморфологічні особливості м'язів, діючих на плечовий суглоб, деяких представників ряду горобцеподібних – *Ordo Passeriformes*. Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С.З. Гжицького. 2017. Т 19. № 77. С. 55–59. <https://doi.org/10.15421/nvlvet7713>.

Слабий О.Б. Ядерно-цитоплазматичні відношення у кардіоміоцитах та ендотеліоцитах передсердь легеневого серця. Здобутки клінічної та експериментальної медицини. 2016. № 4. С. 103–106. <https://doi.org/10.11603/1811-2471.2016.v0.i4.7089>.

Чернявський А.В. Динаміка ядерно-цитоплазматичного відношення кардіоміоцитіву серці щурів в ранньому постнатальному періоді в нормі та експерименті. Вісник Вінницького національного медичного університету. 2019. Т. 23. № 1. С. 89–93. [https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2019-23\(1\)-14](https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2019-23(1)-14).

Шнуренко Е.О., Студенок А.А., Карповський В.І., Трокоз В.О., Постой Р.В. Вплив тонузу автономної нервової системи на інтенсивність росту у курей. Наукові горизонти. 2020. № 07 (92). С. 14–18. <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2020-92-7-14-18>.

Agashiwala R.M., Louis E.D., Hof P.R., Perl D.P. A novel approach to non-biased systematic random sampling: a stereologic estimate of Purkinje cells in the human cerebellum. *Brain research*. 2008. Vol. 1236. P. 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.07.119>.

Amore G., Spoto G., Ieni A., Vetri L., Quatrosi G., Di Rosa G., Nicotera A.G. A Focus on the Cerebellum: From Embryogenesis to an Age-Related Clinical Perspective. *Frontiers in systems neuroscience*. 2021. № 15. 646052 p. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2021.646052>.

Garman R.H. Histology of the central nervous system. *Toxicologic pathology*. 2011. Vol. 39. № 1. P. 22–35. <https://doi.org/10.1177/0192623310389621>.

Herculano-Houzel S., Lent R. Isotropic fractionator: A simple, rapid method for the quantification of total cell and neuron numbers in the brain. *J. Neurosci*. 2005. Vol. 25. № 10. P. 2518–2521.

Hoxha E., Balbo I., Miniaci M.C., Tempia F. Purkinje Cell Signaling Deficits in Animal Models of Ataxia. *Frontiers in synaptic neuroscience*. 2018. Vol. 10. № 6. <https://doi.org/10.3389/fnsyn.2018.00006>.

Kang S.W. Central Nervous System Associated With Light Perception and Physiological Responses of Birds. *Frontiers in physiology*. 2021. № 12. 723454 p. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.723454>.

Kim J.A., Sekerková G., Mugnaini E., Martina, M. Electrophysiological, morphological, and topological properties of two histochemically distinct subpopulations of cerebellar unipolar brush cells. *Cerebellum (London, England)*. 2012. Vol. 11. № 4. P. 1012–1025. <https://doi.org/10.1007/s12311-012-0380-8>.

Krastev D. Electronmicroscopical investigation of the small neurons in trigeminal ganglion. *Journal of IMAB-Annual Proceeding (Scientific Papers)*. Vol. 14. № 1. P. 27–29.

Marugán-Lobón J., Watanabe A., Kawabe S. Studying avian encephalization with geometric morphometrics. *Journal of anatomy*. 2016. Vol. 229. № 2. P. 191–203. <https://doi.org/10.1111/joa.12476>.

Olkowicz S., Kocourek M., Luean R.K., Portes M., Fitch W.T., Herculano-Houzel S., Nimec P. Birds have primate-like numbers of neurons in the forebrain. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2016. Vol. 113. P. 7255–7260. <https://doi.org/10.1073/pnas.1517131113>.

Rajković K., Marić D.L., Milošević N.T., Jeremic S., Arsenijević V.A., Rajković N. Mathematical modeling of the neuron morphology using two dimensional images. *Journal of theoretical biology*. 2016. Vol. 390. P. 80–85. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2015.11.019>.

Ramezani A., Goudarzi I., Lashkarboluki T., Ghorbanian M.T., Abrari K., Elahdadi Salmani M. Role of Oxidative Stress in Ethanol-induced Neurotoxicity in the Developing Cerebellum. *Iranian journal of basic medical sciences*. 2012. Vol. 15. № 4. P. 965–974. <https://doi.org/10.22038/IJBMS.2012.4894>.

Smaers J.B., Turner A.H., Gómez-Robles A., Sherwood C. C. A cerebellar substrate for cognition evolved multiple times independently in mammals. *eLife*. 2018. № 7. e35696 p. <https://doi.org/10.7554/eLife.35696>.

Sokulskiy I.M., Goralskiy L.P., Kolesnik N.L., Dunaievskaya O.F., Radzikhovskiy N.L. Histostructure of the gray matter of the spinal cord in cattle (*Bos Taurus*). *Ukrainian Journal of Veterinary and Agricultural Sciences*. 2021. Vol. 4. № 3. P. 11–15. <https://doi.org/10.32718/ujvas4-3.02>.

Sultan F. Why some bird brains are larger than others. *Current biology : CB*. 2005. Vol. 15. № 17. P. 649–650. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2005.08.043>.

Voogd J. A note on the definition and the development of cerebellar Purkinje cell zones. *Cerebellum (London, England)*. 2012. Vol. 11. № 2. 422–425. <https://doi.org/10.1007/s12311-012-0367-5>.

Watanabe A., Balanoff A.M., Gignac P.M., Gold M.E.L., Norell M.A. Novel neuroanatomical integration and scaling define avian brain shape evolution and development. *ELife*. 2021. № 10. e68809 p. <https://doi.org/10.7554/eLife.68809>.

Zhang X.Y., Wang J.J., Zhu J.N. Cerebellar fastigial nucleus: from anatomic construction to physiological functions. *Cerebellum & ataxias*. 2016. № 3. 9 p. <https://doi.org/10.1186/s40673-016-0047-1>.

References (translated & transliterated)

Horalskyi, L.P., Khomych, V.T., & Kononskyi, O.I. (2019). Osnovy histolohichnoyi tekhniky i morfofunktsional'ni metody doslidzhennya u normi ta pry patolohiyi [Fundamentals of histological technique and morphofunctional research methods in normal and pathology]. Zhytomyr : Polissia [in Ukrainian].

Grechukha, V., & Otych, D. (2020). Vplyv neyroplastychnosti nervovoyi systemy na rozvytok osobystosti u pidlitkovomu vitsi [The influence of neuroplasticity of the nervous system on the development of personality in adolescence]. *Naukovyy chasopys NPU imeni M.P. Drahomanova. Seriya 12. Psykholohichni nauky [Scientific Journal of National Pedagogical Dragomanov University. Series 12. Psychological Sciences]*, 11 (55), 48–56. [https://doi.org/10.31392/NPU-nc.series12.2020.11\(56\).04](https://doi.org/10.31392/NPU-nc.series12.2020.11(56).04) [in Ukrainian].

Dehtyarenko, T.V. (2018). Ontolohiya vyznachennya osnovnykh vlastyvostey nervovoyi systemy lyudyny v kontsepti rozrobky problemy individual'nosti [The ontology of the definition of the main properties of the human nervous system in the concept of developing the problem of individuality]. *Ukrayins'kyi zhurnal medytsyny, biolohiyi ta sportu [Ukrainian Journal of Medicine, Biology and Sport]*, 3, 5 (14), 266–274. <https://doi.org/10.26693/jmbs03.05.266> [in Ukrainian].

Yevropeys'ka konventsyya pro zakhyst domashnikh tvaryn» vid 13.11.1987 r., shcho ratyfikovano: Zakonom Ukrayiny № 578-VII (578-18) vid 18.09.2013 [European Convention on the Protection of Domestic Animals» dated November 13, 1987, ratified by: Law of Ukraine No. 578-VII (578-18) dated September 18, 2013]. [Electronic resource] URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_a15#Text (access date 03.02.2024) [in Ukrainian].

Zakon Ukrayiny. Pro zakhyst tvaryn vid zhorstokoho povodzhennya (Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrayiny (VVR), 2006, № 27, st. 230) [Law of Ukraine No. 3447-IV “About protection of animals from cruelty”. (2006, February)]. [Electronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3447-15#Text> (access date 05.02.2024) [in Ukrainian].

Karunskyi, O.Y., Makarinskaya, A.V., & Sevastyanov, O.V. (2018). Dynamika pokaznykiv krovi kurchat pry vykorystanni fermentnoho preparatu “Klerizym hranul'ovanyy” v yikh hodivli [Dynamics of blood indicators of chicken at using enzyme preparations “klerizlm granular” in their feeding]. *Zernovi produkty i kombikormy [Grain Products and Mixed Fodder's]*, 18 (2). <https://doi.org/10.15673/gpmf.v18i2.953> [in Ukrainian].

Melnyk, O.O., & Melnyk, M.V. (2017). Biomorfologichni osoblyvosti m'yaziv, diyuchykh na plechovyy suhlob, deyakykh predstavnykiv ryadu horobtsepodibnykh – Ordo Passeriformes [Biomorphological features of muscles that act on the shoulder joint of some representatives of Order Passeriformes]. *Naukovyy visnyk LNUVMBT imeni S.Z. Gzhyts'koho [Scientific Messenger LNUVMBT named after S.Z. Gzhytskyj]*, 19 (77), 55–59. <https://doi.org/10.15421/nvlvet7713> [in Ukrainian].

Slabyi, O.B. (2017). Yaderno-tsytoplazmatychni vidnoshennya u kardiomiotsytakh ta endoteliotsytakh peredserd' lehenevoho sertsya [Nucleo-cytoplasmatical relations of cardiomyocytes and endotheliocytes of pulmonary heart atrium]. *Zdobutky klinichnoyi ta eksperymental'noyi medytsyny [Achievements of Clinical and Experimental Medicine]*, 4, 103–106. <https://doi.org/10.11603/1811-2471.2016.v0.i4.7089> [in Ukrainian].

Cherniavskyi, A.V. (2019). Dynamika yaderno-tsytoplazmatychnoho vidnoshennya kardiomiotsytivu sertsia shchuriv v rann'omu postnatal'nomu periodi v normi ta eksperymenti [Dynamics of nuclear-cytoplasmic relations in cardiomyocytes in the rat's heart in the early postnatal period in normal conditions and experiment]. *Visnyk Vinnyts'koho natsional'noho medychnoho universytetu [Reports of Vinnytsia National Medical University]*, 23 (1), 89–93. [https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2019-23\(1\)-14](https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2019-23(1)-14) [in Ukrainian].

- Shnurenko, E., Studenok, A., Karpovskiy, V., Trokoz, & V., Postoi, R. (2020). Vplyv tonusu avtonomnoyi nervovoyi systemy na intensyvniost' rostu u kurey [Influence of tone of autonomous nervous system on growth intensity in chickens]. *Naukovi horyzonty [Scientific Horizons]*, 07 (92), 14–18. <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2020-92-7-14-18> [in Ukrainian].
- Agashiwala, R.M., Louis, E.D., Hof, P.R., & Perl, D.P. (2008). A novel approach to non-biased systematic random sampling: a stereologic estimate of Purkinje cells in the human cerebellum. *Brain research*, 1236, 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.07.119> [in English].
- Amore, G., Spoto, G., Ieni, A., Vetri, L., Quatrosi, G., Di Rosa, G., & Nicotera, A.G. (2021). A Focus on the Cerebellum: From Embryogenesis to an Age-Related Clinical Perspective. *Frontiers in systems neuroscience*, 15, 646052. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2021.646052> [in English].
- Garman, R.H. (2011). Histology of the central nervous system. *Toxicologic pathology*, 39 (1), 22–35. <https://doi.org/10.1177/0192623310389621> [in English].
- Herculano-Houzel, S., & Lent, R. (2005). Isotropic fractionator: A simple, rapid method for the quantification of total cell and neuron numbers in the brain. *J. Neurosci*, 25 (10), 2518–2521 [in English].
- Hoxha, E., Balbo, I., Miniaci, M.C., & Tempia, F. (2018). Purkinje Cell Signaling Deficits in Animal Models of Ataxia. *Frontiers in synaptic neuroscience*, 10 (6). <https://doi.org/10.3389/fnsyn.2018.00006> [in English].
- Kang, S.W. (2021). Central Nervous System Associated With Light Perception and Physiological Responses of Birds. *Frontiers in physiology*, 12, 723454. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.723454> [in English].
- Kim, J.A., Sekerková, G., Mugnaini, E., & Martina, M. (2012). Electrophysiological, morphological, and topological properties of two histochemically distinct subpopulations of cerebellar unipolar brush cells. *Cerebellum (London, England)*, 11 (4), 1012–1025. <https://doi.org/10.1007/s12311-012-0380-8> [in English].
- Krastev, D. (2007). Electronmicroscopical investigation of the small neurons in trigeminal ganglion. *Journal of IMAB-Annual Proceeding (Scientific Papers)*, 14 (1), 27–29 [in English].
- Marugán-Lobón, J., Watanabe, A., & Kawabe, S. (2016). Studying avian encephalization with geometric morphometrics. *Journal of anatomy*, 229 (2), 191–203. <https://doi.org/10.1111/joa.12476> [in English].
- Olkowicz, S., Kocourek, M., Luean, R.K., Portes, M., Fitch, W.T., Herculano-Houzel, S., & Nimec, P. (2016). Birds have primate-like numbers of neurons in the forebrain. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 113, 7255–7260. <https://doi.org/10.1073/pnas.1517131113> [in English].
- Rajković, K., Marić, D.L., Milošević, N.T., Jeremic, S., Arsenijević, V.A., & Rajković, N. (2016). Mathematical modeling of the neuron morphology using two dimensional images. *Journal of theoretical biology*, 390, 80–85. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2015.11.019> [in English].
- Ramezani, A., Goudarzi, I., Lashkarboluki, T., Ghorbanian, M.T., Abrari, K., & Elahdadi Salmani, M. (2012). Role of Oxidative Stress in Ethanol-induced Neurotoxicity in the Developing Cerebellum. *Iranian journal of basic medical sciences*, 15 (4), 965–974. <https://doi.org/10.22038/IJBMS.2012.4894> [in English].
- Smaers, J.B., Turner, A.H., Gómez-Robles, A., & Sherwood, C.C. (2018). A cerebellar substrate for cognition evolved multiple times independently in mammals. *eLife*, 7, e35696. <https://doi.org/10.7554/eLife.35696> [in English].
- Sokulskyi, I.M., Goralskyi, L.P., Kolesnik, N.L., Dunaievska, O.F., & Radzikhovsky, N.L. (2021). Histostructure of the gray matter of the spinal cord in cattle (*Bos Taurus*). *Ukrainian Journal of Veterinary and Agricultural Sciences*, 4 (3), 1–15. <https://doi.org/10.32718/ujvas4-3.02> [in English].
- Sultan, F. (2005). Why some bird brains are larger than others. *Current biology : CB*, 15 (17), R649–R650. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2005.08.043> [in English].
- Voogd, J. (2012). A note on the definition and the development of cerebellar Purkinje cell zones. *Cerebellum (London, England)*, 11 (2), 422–425. <https://doi.org/10.1007/s12311-012-0367-5> [in English].
- Watanabe, A., Balanoff, A.M., Gignac, P.M., Gold, M.E.L., & Norell, M.A. (2021). Novel neuroanatomical integration and scaling define avian brain shape evolution and development. *eLife*, 10, e68809. <https://doi.org/10.7554/eLife.68809> [in English].

Zhang, X.Y., Wang, J.J., & Zhu, J.N. (2016). Cerebellar fastigial nucleus: from anatomic construction to physiological functions. *Cerebellum & ataxias*, 3, 9. <https://doi.org/10.1186/s40673-016-0047-1> [in English].

Отримано: 26.03.2024
Прийнято: 15.04.2024



УДК 594.38:[502:591.9](477.282)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.5>

ЕКОЛОГО-ФІЗІОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПОШИРЕННЯ ПРІСНОВОДНОГО М'ЯКУНА *PLANORBARIUS* (SUPERSPECIES) *CORNEUS SENSU LATO* (GASTROPODA, PULMONATA) У ГІДРОМЕРЕЖІ УКРАЇНИ

Ю. В. Іконнікова¹, А. П. Стадниченко²

Однією з невідворотних актуальних проблем сучасної гідроекології є з'ясування рівнів низки показників еколого-фізіологічних здатностей провідних домінуючих компонентів природних прісноводних екосистем широкоареальних видів м'якунів. Важливим є дослідження ролі гідробіонтів у забезпеченні необхідного для підтримання нормального рівня функціонування як окремих індивідів, так і їх популяцій та біоценозів, звичайними компонентами котрих вони є. Дослідження еколого-фізіологічних особливостей витушки рогової є наразі безсумнівно актуальним у зв'язку з широкою екологічною валентністю цього молюска, розповсюдженого на помірнокліматичних теренах прісноводної гідромережі різних континентів (Північної Америки, Європи, Азії, Африки, Австралії); важливою роллю в прісноводних екосистемах, зумовленою його багаточисельністю. Воно дозволить розширити перелік невисвітлених ще до сьогоднішнього дня питань про те, що саме спонукало природодослідників-зоологів піднести систематичний ранг цього зоологічного об'єкту з рівня видового на вищий систематичний рівень – надвидовий. Результатами даного дослідження підтверджено, що досить широко розповсюджений нині в Україні *Planorbarius corneus* – це не вид, а м'якун надвидового рангу, котрий представлений двома генетичними вікаруючими аловидами – «західним» і «східним», статистично вірогідно надійно ($p \leq 0,001$) розмежованими один від другого як за особливостями їх географічного розповсюдження, так і за їх еколого-фізіологічними показниками. Ареал «західного» аловиду м'якуна простягається гідромережею помірноконтинентальної смуги Європи від узбережжя Атлантичного океану й аж до русла Дніпра включно. Ареал «східного» аловиду – територія, подібна за площею, показниками гідрологічного режиму, частково за особливостями клімату (це теж помірнокліматична зона). Вона пролягає широкою смугою від Дніпра до Уральських гір, а поза ними – до східного берегу р. Єнісей. Таким є євро-азійський ареал цього широкоареального надвиду м'якуна – витушки рогової. До русла Дніпра ареал його представлений виключно «західним» аловидом, а поза ним (від Дніпра й до Єнісею включно) – тільки таким «східним».

Ключові слова: витушка рогова, *Planorbarius corneus*, аловидами, гідросфера, поширення, екологія, фізіологія.

¹ асистент кафедри ботаніки, біоресурсів та збереження біорізноманіття (Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: ikon_y@i.ua

ORCID: 0000-0001-6887-0529

² доктор біологічних наук, професор кафедри зоології, біологічного моніторингу та охорони природи (Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: stadnychenko2016@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7738-4776

ECO-PHYSIOLOGICAL FEATURES OF DISTRIBUTION OF FRESHWATER MOLLUSC *PLANORBARIUS* (SUPERSPECIES) *CORNEUS SENSU LATO* (GASTROPODA, PULMONATA) IN UKRAINIAN RIVER NETWORK

Yu. V. Ikonnikova, A. P. Stadnychenko

One of the inevitable actual problems of the modern hydroecology is to establish the levels of the set of indexes of eco-physiological capabilities of the leading dominant components in natural freshwater ecosystems of widespread mollusc species, and the role of the latest in maintenance of necessary normal functioning level of separate individuals and their populations and biocenoses, to which they belong.

The study of eco-physiological features of great ramshorn is now quite actual due to its wide ecological valence, its wide range in the moderate climate freshwaters river networks on different continents (of North America, Europe, Asia, Africa and Australia), and its important role caused by its abundance in biocenoses inhabited by it. Because it will allow to establish and estimate the level of possibilities of those reasons that made us to raise the significance and to widen the list of still unlit questions about the reasons for zoologists to raise the systematic rang of this object from species to the higher, superspecies.

The results of our study undoubtedly confirm that the *Planorbarius corneus*, widespread in Ukraine, is not a mollusc species but a superspecies presented by two genetic vicaristic allospecies – “western” and “eastern”, statistically significantly ($p \leq 0,001$) separated from each other as by their geographic distribution features, as by eco-physiological indexes.

The range of the former allospecies lasts by river network of moderate climate zone of Europe from the Atlantic coast to the Dnipro channel inclusively. The range of the latter allospecies – similar as by its shape and area, as by the hydrological indexes (despite it is the moderate zone as well), lasts as the wide stripe from Dnipro to Ural Mountains and behind them to the eastern coast of Yenisei river. This is the Euro-Asian range of this wide-range mollusc superspecies, the great ramshorn. Before the Dnipro channel it represents only “western” allospecies, and after it (from Dnipro to Yenisei inclusively) – only “eastern” one.

Key words: great ramshorn, *Planorbarius corneus*, allospecies, hydrosphere, distribution, ecology, physiology.

Вступ

Витушка рогова *Planorbarius corneus* гідромережі Європи у видовому статусі вперше описана і представлена була К. Ліннеєм у капітальній його праці «Systema naturae» (1758). Протягом наступних двох із половиною століть (1758–2006) родова належність її змінювалася двічі: спочатку – на *Planorbis*, пізніше – на *Coretus*. Наразі, однак, цього м'якуна докладно досліджено і ретельно переглянуто його положення у системі тваринного світу, внаслідок чого систематичний статус витушки рогової піднесено до вищого рівня – надвидового. Це відбулося завдяки тому, що з кінця ХХ – початку ХХІ ст. біологам-зоологам уперше стали доступними нові методи глибокого рівня дослідження тваринних об'єктів – каріологічні і генетичні. Застосуванням саме їх і було нещодавно беззаперечно доведено вперше, що *P. corneus* – не вид, а зоологічний об'єкт вищого рангу – надвидового, представлений у різних компонентах гідромережі України двома його чітко й статистично вірогідно розмежованими поміж собою алопатричними вікаруючими аловидами (рис. 1) – «західним»

і «східним» (Гарбар, 2003, 2006, 2009; Гарбар і Гарбар, 2002, 2003, 2007; Garbar & Garbar, 2005; Бабич та ін., 2023; Іконнікова та ін., 2023). Вони беззаперечно відрізняються один від другого не лише за цифровими параметрами 12-ої пари їх хромосом, а також за показниками мірних ознак низки органів їх статевої системи (вісім з 10-ти: відносні розміри їх вагін, сперматек і їх проток, тощо) (Гарбар, 2006).

Порівнювані аловиди розрізняються також за географічними координатами просторового розміщення теренів ареалів (рис. 2), їх формою і розмірами, котрі зумовлюють особливості їх місцеположень і значення величин кліматичних показників, узалежнюючи тим самим рівні придатності територій для благополучного існування популяцій *Planorbarius* (superspecies) *corneus sensu lato* (Стадниченко та ін., 2020).

Широке розповсюдження витушки рогової по гідромережах різних континентів, котре відбулося ще історично у прадавні часи, стало можливим із появою у цього м'якуна у процесі його філогенетичного розвитку легеневого дихання – значно доско-

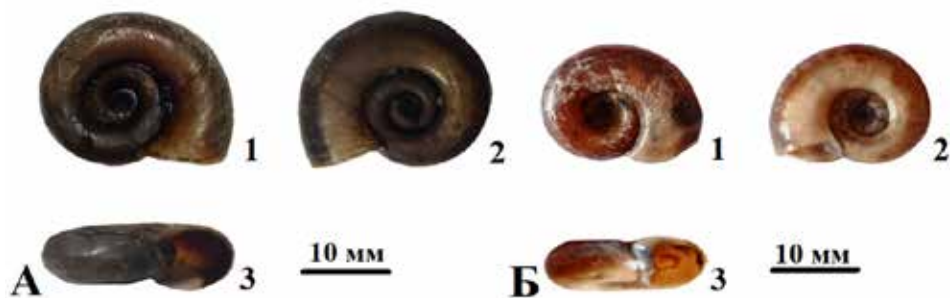


Рис. 1. Черепашки аловидів *P. (superspecies) corneus s. lato*: А – «західний» (р. Ірша, м. Малин Житомирської обл.); Б – «східний» (р. Псел, с. Балаклія Полтавської обл.); 1 – згори; 2 – знизу; 3 – збоку

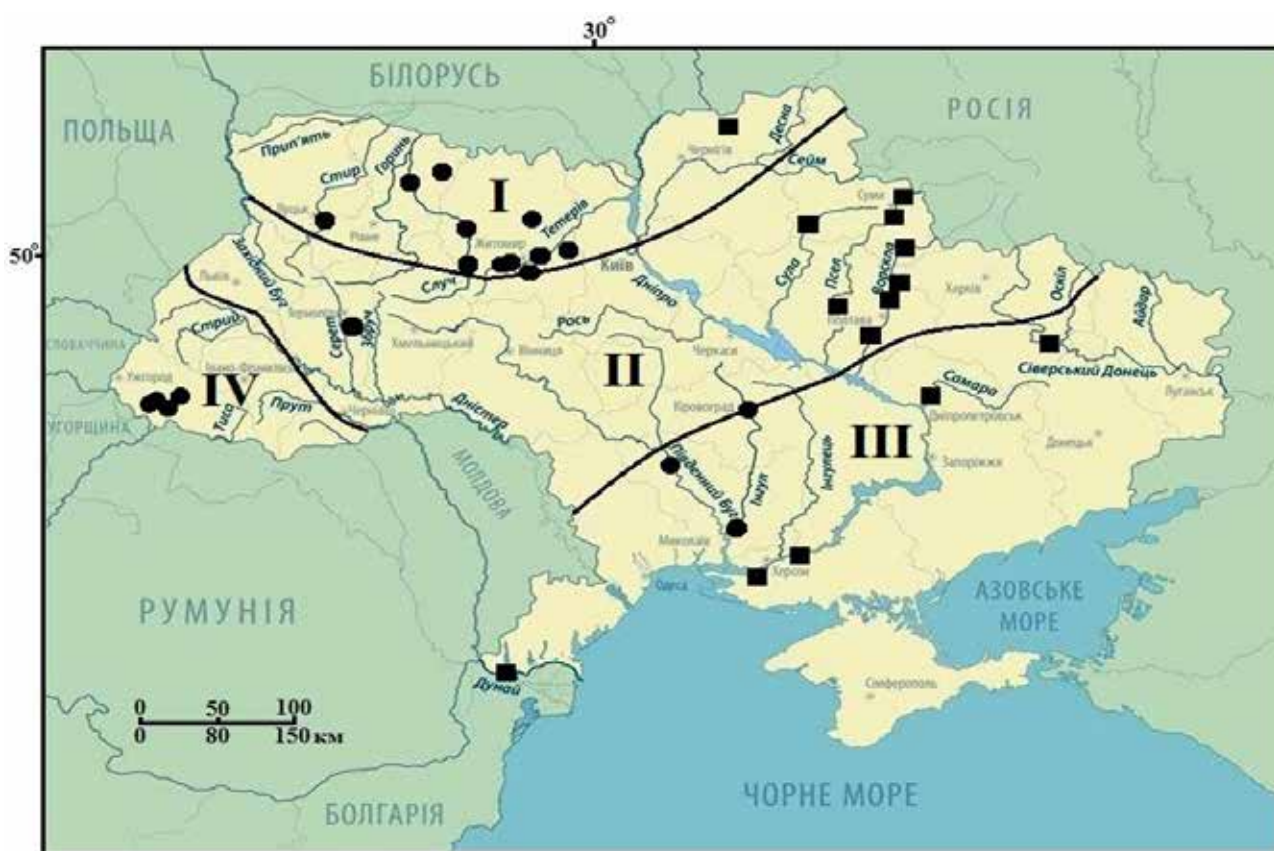


Рис. 2. Поширення аловидів *P. (superspecies) corneus s. lato* на території України: I – Лісова Поліська зона; II – Лісостепова зона; III – Степова зона; IV – Карпатський гірський регіон; – «західний»; – «східний»

налішого, спеціалізованого і ефективного, на додаток до вже наявної у нього здатності до поверхневого (дифузного) дихання (Regondaud, 1961). Піднесення майже вдвічі рівня ефективності дихальної функції у цих м'якунів унаслідок надбання ними бімодальності останньої, безсумнівно, зумовило суттєве піднесення у них усіх, без жодних виключень, рівнів перебігу фізіо-

логічних і біохімічних процесів життєзабезпечення. Це, поза всілякими сумнівами, посприяло цим м'якунам у пошуках нових для них, значно благополучніших місць перебувань для підтримання оптимального рівня їх життєздатності. Саме через це, напевне, й відбулося у давні геологічні епохи поширення їх особин по різноманітних водних об'єктах – компонентах прісно-

водних гідромереж багатьох континентів, де вони успішно акліматизувалися. Донині чимало оселень витушки рогової у Північній Америці, Євразії, Африці, Австралії представлені багаточисельними її популяціями (Baker, 1945).

Матеріал і методи

Матеріалом для нашого дослідження послуговували власні збори м'якунів, здійснені авторками цього повідомлення як вручну, так і драгуванням об'єктів гідромережі усіх природно-географічних зон України (1968–2024), так і такі ж, із конхіологічних колекцій досліджуваного нами м'якуна, опрацьовані А. П. Стадниченко у природничих музеях низки європейських країн (Іспанія, Португалія, Франція, Англія, Італія, Швейцарія, Чехія, Словенія, Польща) протягом 1994–2024 років. Важливою основою для дослідження останніх послуговували ті знання і навички вивчення музейних колекцій м'якунів, котрі були набуті нею раніше – під час ознайомлення із колекціями черепашок *Planorbarius sp.* Національного науково-природничого музею НАН України (м. Київ), Державного природничого музею НАН України (м. Львів), Зоологічного музею імені Бенедикта Дибовського (м. Львів).

У вітчизняних музейних колекціях було досліджено 387 екз. *P. (superspecies) corneus s. lato*, у зарубіжних – 936 екз.

Надвидову ідентифікацію об'єкта нашого дослідження – *P. (superspecies) corneus s. lato* здійснено згідно методики, представлені у публікації авторки цього надвиду – Діани Гарбар (2006).

Результати та обговорення

У гідромережу Європи витушка рогова *P. corneus* потрапила протягом мезозойської ери і, найвірогідніше, із Північної Америки або з котрогось із сусідніх їй островів Атлантичного океану (Linnaeus, 1758).

Витушка рогова – один із найкрупніших і найпоширеніших представників родини *Planorbidae*. Вона має добре розвинену м'язову систему, яка дозволяє їй успішно і досить швидко змінювати своє місцезонавання у межах ареалу її перебування за відносно короткі проміжки часу. Це важливо для її особин як за пошуків ними кормових об'єктів, так і у період розмноження – при виявленні статевозрілих особин. Парування останніх відбувається найуспішніше за оптимальних щодо звершення цього процесу температурних умов середовища. Адже витушка рогова – теплолюбний стенотермний надвид: оптималь-

ний діапазон температури водного середовища для «західного» і «східного» аловидів становить 16–25 °С, а найнижча і найвища витримувані ними її температури – це відповідно 0,4 °С і 39–42 °С (Бабич, 2021). Оптимальний діапазон умов температурного режиму для особин обох досліджуваних аловидів становить 16–25 °С. Виходячи з наведених вище даних, стає цілком зрозумілим, чому ці м'якуни, розселяючись по різних континентах, опанували у межах їх однакові (або дуже близькі) за температурними умовами середовища їх перебування, а саме – помірнокліматичні (Бабич та ін., 2020; Стадниченко і Іконнікова, 2023).

Сучасний ареал витушки рогової у західно-східному напрямку простягається від крайньої точки Західної Європи (мис Кабо Рока на атлантичному узбережжі Португалії) на схід її аж до Уралу, продовжуючись за ним через Західний Сибір до східного берегу р. Об включно. Північно-південний напрямок її ареалу просторово починається країнами Північної Європи (зокрема, це – Швеція та Норвегія), простягаючись на південь через Східну Європу аж до озера Охрид (Baker, 1945; Grossu, 1956). Наголосимо, однак, на тому, що від атлантичного узбережжя Європи й до русла Дніпра фауна цього м'якуна представлена наразі виключно аловидом «західним», а від Дніпра до Єнісею включно – тільки аловидом «східним».

В Україні ареал аловиду «західного» – це сукупність як стоячих, так і проточних водойм прісноводної гідромережі її Правобережжя з його теплим помірно-континентальним кліматом. Натомість, сучасний ареал аловиду «східного» – це здебільшого невеличкі за площами водойми, розкидані по територіях як Лівобережжя Дніпра, так і усієї Степової зони України. Сухий і спекотний клімат обох згаданих вище природно-географічних зон України зумовлюється комплексною дією двох причин. По-перше, це – південно-східне місцезонавання цього регіону, умови якого відзначаються значно сухішим і теплішим кліматом порівняно із західними його теренами. По-друге, тут значно більше дається взнаки зростаючий рік за роком рівень глобального потепління клімату Землі (Бойченко та ін., 2000; Стадниченко і Бабич, 2021). Наслідком його якраз і стало екстремальне скорочення у межах цієї природно-географічної зони як загальної кількості популяцій «східного» аловиду витушки, так і щільності населення

останніх. Зрушення вже згаданих вище кліматичних умов середовища максимально вплинуло на загальну кількість й щільність населення популяції аловида «східного». Через це в обмілілих унаслідок пересихання компонентах річкової мережі, у яких інтенсивно здійснюється процес випаровування води, відбувається зниження її рівня до смертельно небезпечного для цих м'якунів (Стадниченко та ін., 2007, 2008; Сніжко та ін., 2021).

Подібне животіння у згаданих вище умовах – серйозна загроза щодо збереження цілісності населення їх популяцій. Одну з таких й виявлено нами було наприкінці липня 2022 року в пересихаючому допливі р. Айдар неподалік від м. Старобільськ (Луганська обл.). Із 289 екз. досліджених особин достеменно беззаперечні ознаки життєздатності їх (наявність м'язової активності, тактильної чутливості, здатності відповідати на подразнення) зареєстровано було усього лише у 14,5% досліджених малакооб'єктів. Такі результати дозволяють передбачати, що уникнення «східним» аловидом витушки подібного роду несприятливих, а часом і смертельно небезпечних щодо неї температурних умов середовища, відбуватиметься шляхом міграції особин його популяцій у прийнятніші щодо них умови існування.

Переселення популяції цього аловида, котре розпочалася з останньої чверті ХХ – початку ХХІ-го століть і здійснювалось у напрямку на схід, протягом останніх 15–20 років відбувалось і буде відбуватися й надалі у північно-східному напрямку (Гарбар та ін., 2020). Що стосується у цьому плані аловида «західного», то його популяції у найближчому майбутті будуть скеровуватися у напрямку на захід і, можливо, на північний захід.

Висновки

Надвид *P. (superspecies) corneus s. lato* у гідромережі України представлений двома генетичними аловидами-вікаріантами – «західним» і «східним», чітко просторово розмежованими один від другого. Ареал аловида «західного» простягається у межах Правобережжя України, якому притаманний теплий помірно-континентальний клімат. Сучасний ареал аловида «східного» розкиданий по територіях як Лівобережжя, так і усієї її Степової зони, яким притаманний значно спекотніший і сухіший клімат. Внаслідок глобального потепління клімату Землі спостерігається суттєве скорочення як загальної кількості популяцій, так і щільності населення «східного» аловида витушки рогової. Популяції «західного» аловида у майбутньому будуть продовжувати мігруватися на захід і на північний захід.

Список використаної літератури

- Бабич Ю. Аловида *Planorbarius corneus s. lato* (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata, Vulinidae) поверхневих вод України. *Проблеми та перспективи розвитку біологічної освіти* : зб. наук. пр. Переяслав, 2021. С. 110–113.
- Бабич Ю., Киричук Г., Романюк Р., Стадниченко А., Уваєва О. Вплив іонів Cu (II) на легенево й поверхнєве дихання аловидів *Planorbarius corneus s. l.* (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata) гідромережі України. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2023. № 88. С. 61–68. <https://doi.org/10.30970/vlubs.2023.88.07>.
- Бабич Ю.В., Стадниченко А.П., Мороз В.В. Аловида *Planorbarius (superspecies) corneus* (Mollusca, Pulmonata, Vulinidae) поверхневих вод Українського Полісся (особливості поширення та екології). *Водні екосистеми та збереження їх біорізноманіття* : зб. наук. пр. Житомир, 2020. С. 55–57.
- Бойченко С.Г. Волощук В.М., Дорошенко І.А. Глобальне потепління та його наслідки на території України. *Український географічний журнал*. 2000. № 3. С. 59–68.
- Гарбар Д.А. Діагностичне значення конхіологічних ознак молюсків роду *Planorbarius* (Vulinidae, Gastropoda, Pulmonata). *Вісник Житомирського державного педагогічного університету*. 2003. № 11. С. 238–240.
- Гарбар Д.А. Молюски роду *Planorbarius* (Gastropoda, Pulmonata, Vulinidae) фауни України: аналіз морфологічних, каріологічних і генетичних ознак : автореф. дис. ... канд. біол. наук. Київ, 2006. 21 с.
- Гарбар Д.А. Конхіологічні особливості *Planorbarius corneus s. lato* (Gastropoda, Pulmonata) фауни України. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Біологія*. 2009. Т. 26. С. 56–61.
- Гарбар Д.А., Гарбар О.В. Проблеми і перспективи каріологічних досліджень червононогих молюсків (Gastropoda, Pulmonata). *Вісник Житомирського державного педагогічного університету*. 2003. № 1. С. 3–4.

Гарбар Д.А., Гарбар О.В. Фауна прісноводних легеневиx молюсків басейну р. Сіверський Донець. *Динаміка наукових досліджень*. Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2003. Т. 5. С. 35–36.

Гарбар О.В., Бабич Ю.В., Стадниченко А.П., Гарбар Д.А. Біокліматичні особливості екологічних ніш та моделювання динаміки ареалів аловидів *Planorbarius corneus* в умовах змін клімату. *Біологічні дослідження – 2020* : зб. наук. праць. Житомир : О.О. Євенок, 2020. С. 150–153.

Іконнікова Ю.В., Стадниченко А.П., Уваєва О.І. Геноеографічні особливості поширення популяцій аловидів витушки *Planorbarius (superspecies) corneus* (Mollusca: Gastropoda: Planorbidae) гідромережі України. *Актуальні питання біологічної науки* : зб. статей. Ніжин : НДУ імені Миколи Гоголя, 2023. С. 46–48.

Сніжко С., Шевченко О., Дідовець Ю. Аналіз впливу кліматичних змін на водні ресурси України. Київ : Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2021. 68 с.

Стадниченко А.П., Бабич Ю.В. Що чекає на популяції аловидів витушок гідромережі України за глобального потепління? *Проблеми та перспективи розвитку сучасної біології та біологічної освіти* : зб. наук. пр. Житомир : ПП «Євро-Волинь», 2021. С. 98–101.

Стадниченко А.П., Бабич Ю.В., Гирин В.К. Просторовий розподіл популяцій *Planorbarius corneus* (Linnaeus, 1758) у гідромережі України у зв'язку із сучасними глобальними кліматичними зрушеннями умов довкілля. *Актуальні питання біологічної науки* : зб. статей. Ніжин : НДУ ім. Миколи Гоголя, 2020. С. 96–98.

Стадниченко А.П., Богачова А.М., Шубрат Ю.В. Вплив антропогенної трансформації навколишнього середовища на стан прісноводної малакофауни України. *Вісник Державного агрологічного університету*. 2008. № 1. С. 139–147.

Стадниченко А.П., Богачова А.М., Шубрат Ю.В. Малакологічні і паразитарні наслідки глобальних змін клімату Землі. *Еколого-фауністичні особливості водних та наземних екосистем*. Львів : Видавництво ЛНУ ім. І. Франка, 2007. С. 159–162.

Стадниченко А.П., Іконнікова Ю.В. Адаптивні еколого-фізіологічні спроможності генетичних аловидів-вікаріантів *Planorbarius (superspecies) corneus* s. l. (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata, Planorbidae) гідромережі України. *Біологічні дослідження – 2023* : зб. наук. пр. Житомир, 2023. С. 52–55.

Baker F.C. The molluscan family Planorbidae. Urbana: Univ. Illinois press, 1945. 530 p.

Garbar D.A., Garbar O.V. Structure of the genus *Planorbarius* in the Ukrainian fauna. *Molluscs, Quaternary, faunal changes and environmental dynamics*. Prague, 2005. P. 13–14.

Grossu A. Mollusca (Gastropoda: Pulmonata). Bucuresti: Acad. Rep. Popul. Romine, 1956. 518 p. Linnaeus C. Systema naturae. Holmiae : Laurentii, 1758. 823 p.

Régondaud I. Development de la cavité pulmonaire et de la cavité palleale chez *Lymnaea stagnalis*. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*. 1961. Vol. 252. P. 173–181.

References (translated & transliterated)

Babych, Ju. (2021). Alovydy *Planorbarius corneus* s. lato (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata, Bulinidae) poverkhnevyykh vod Ukrainy [Allopecies *Planorbarius corneus* s. lato (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata, Bulinidae) of surface waters of Ukraine]. *Zbirnyk naukovykh prats "Problemy ta perspektyvy rozvytku biologichnoji osvity"* [Collection of scientific works "Problems and prospects of the development of biological education"]. Perejaslav, 110–113 [in Ukrainian].

Babych, Ju., Kyrychuk, Gh., Romanjuk, R., Stadnychenko, A., & Uvajeva, O. (2023). Vplyv ioniv Cu (II) na legheneve j poverkhneve dykhannja alovydiv *Planorbarius corneus* s. l. (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata) ghidromerezhi Ukrainy [Effect of Cu (II) ions on lung and direct diffuse respiration of the allopecies of *Planorbarius corneus* s. l. (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata) of the hydrological network of Ukraine]. *Visnyk Ljvivskogho universytetu. Serija biologichna* [Visnyk of the Lviv University. Series Biology], 88, 61–68. <https://doi.org/10.30970/vlubs.2023.88.07> [in Ukrainian].

Babych, Ju.V., Stadnychenko, A.P., & Moroz, V.V. (2020). Alovydy *Planorbarius (superspecies) corneus* (Mollusca, Pulmonata, Bulinidae) poverkhnevyykh vod Ukrainyskoghho Polissja (osoblyvosti poshyrennja ta ekologhiji) [Allopecies *Planorbarius (superspecies) corneus* (Mollusca, Pulmonata, Bulinidae) of the surface waters of the Ukrainian Polissia (features of distribution and ecology)]. *Zbirnyk naukovykh prats "Vodni ekosystemy ta zberezhennja jikh bioriznomanittja"* [Collection of articles "Aquatic ecosystems and preservation of their biodiversity"], 55–57 [in Ukrainian].

Bojchenko, S.Gh., Voloshhuk, V.M., & Doroshenko, I.A. (2000). Ghlobaljne poteplinnja ta jogho naslidky na terytoriji Ukrainy [Global warming and its consequences on the territory of Ukraine]. *Ukrajinsjkyj gheografichnyj zhurnal [Ukrainian Geographical Journal]*, 3, 59–68 [in Ukrainian].

Gharbar, D.A. (2003). Diagnostychnychny znachennja konkhiologichnykh oznak moljuskiv rodu *Planorbarius* (Bulinidae, Gastropoda, Pulmonata) [Diagnostic Importance of Conchological Features of the Molluscs of the Genus *Planorbarius* (Bulinidae, Gastropoda, Pulmonata)]. *Visnyk Zhytomyrsjkogho derzhavnogho pedagogichnogho universytetu [Bulletin of Zhytomyr State Pedagogical University]*, 11, 238–240 [in Ukrainian].

Gharbar, D.A. (2006). Moljuskij rodu *Planorbarius* (Gastropoda, Pulmonata, Bulinidae) fauny Ukrainy: analiz morfologichnykh, kariologichnykh i ghenetychnykh oznak: avtoreferat dysertaciji kandydata biologichnykh nauk [Molluscs of the genus *Planorbarius* (Gastropoda, Pulmonata, Bulinidae) of the fauna of Ukraine: analysis of morphological, karyological and genetic features: abstract of the dissertation of the candidate of biological sciences]. Kyiv, 21 [in Ukrainian].

Gharbar, D.A. (2009). Konkhiologichni osoblyvosti *Planorbarius corneus* s. lato (Gastropoda, Pulmonata) fauny Ukrainy [Conchological features of *Planorbarius corneus* s. lato (Gastropoda, Pulmonata) of Ukraine fauna]. *Naukovyj visnyk Uzhgorodskogho universytetu. Serija Biologhija [Scientific Bulletin of the Uzhhorod University. Series Biology]*, 26, 56–61 [in Ukrainian].

Gharbar, D.A., & Gharbar, O.V. (2003). Problemy i perspektyvy kariologichnykh doslidzhenj cherevonoghykh moljuskiv (Gastropoda, Pulmonata) [Problems and prospects of karyological studies of gastropod molluscs (Gastropoda, Pulmonata)]. *Visnyk Zhytomyrsjkogho derzhavnogho pedagogichnogho universytetu [Bulletin of Zhytomyr State Pedagogical University]*, 10, 3–4 [in Ukrainian].

Gharbar, D.A., & Gharbar, O.V. (2003). Fauna prisnovodnykh leghenevykh moljuskiv basejnu r. Siversjkyj Donec [Fauna of freshwater lung molluscs of the Siverskyi Donets river basin]. *Dynamika naukovykh doslidzhenj [Dynamics of scientific research]*, 5, 35–36 [in Ukrainian].

Gharbar, O.V., Babych, Ju.V., Stadnychenko, A.P., & Gharbar, D.A. (2020). Bioklimatychni osoblyvosti ekologichnykh nish ta modeljuvannja dynamiky arealiv aloydiv *Planorbarius corneus* v umovakh zmin klimatu [Bioclimatic features of ecological niches and modeling of the dynamics of allopecies *Planorbarius corneus* under conditions of climate change]. *Zbirnyk naukovykh prats "Biologichni doslidzhennia – 2020" [Collection of scientific works "Biological research – 2020"]*. Zhytomyr, pp. 150–153 [in Ukrainian].

Ikonnikova, Ju.V., Stadnychenko, A.P., & Uvajeja, O.I. (2023). Ghenogheografichni osoblyvosti poshyrennja populacij aloydiv vytushky *Planorbarius* (superspecies) *corneus* (Mollusca: Gastropoda: Planorbidae) ghidromerezhi Ukrainy [Genogeographic features of the distribution of populations of the mollusk *Planorbarius* (superspecies) *corneus* (Mollusca: Gastropoda: Planorbidae) in the water network of Ukraine]. *Zbirnyk statej "Aktualjni pytannja biologichnoji nauky" [Collection of articles "Current issues of biological science"]*. Nizhyn, pp. 46–48 [in Ukrainian].

Snizhko, S., Shevchenko, O., & Didovec Ju. (2021). Analiz vplyvu klimatychnykh zmin na vodni resursy Ukrainy [Analysis of the impact of climate change on water resources of Ukraine]. Center for Environmental Initiatives «Ekodia». Kyiv [in Ukrainian].

Stadnychenko, A.P., & Babych, Ju.V. (2021). Shho chekaje na populaciji aloydiv vytushok ghidromerezhi Ukrainy za ghlobaljnogho poteplinnja? [What will happen to the population of allo-species in the water network of Ukraine due to global warming?]. *Zbirnyk naukovykh prats "Problemy ta perspektyvy rozvytku suchasnoji biologhiji ta biologichnoji osvity" [Collection of scientific works "Problems and prospects of the development of modern biology and biological education"]*. Zhytomyr, pp. 98–101 [in Ukrainian].

Stadnychenko, A.P., Babych, Ju.V., & Ghyryn V.K. (2020). Prostorovyj rozpodil populacij *Planorbarius corneus* (Linnaeus, 1758) u ghidromerezhi Ukrainy u зв'язku iz suchasnymy ghlobaljnymy klimatychnymy zrushennjamy umov dovkillja [Spatial distribution of populations of *Planorbarius corneus* (Linnaeus, 1758) in the water network of Ukraine in connection with modern global climatic shifts in environmental conditions]. *Zbirnyk statej "Aktualjni pytannja biologichnoji nauky" [Collection of articles "Current issues of biological science"]*. Nizhyn, pp. 96–98 [in Ukrainian].

Stadnychenko, A.P., Boghachova, A.M., & Shubrat, Ju.V. (2008). Vplyv antropoghennoji transformaciji navkolyshnjogho seredovyshha na stan prisnovodnoji malakofauny Ukrainy [The impact of anthropogenic transformation of the environment on the state of the freshwater malaco-fauna of Ukraine]. *Visnyk Derzhavnogho aghroekologichnogho universytetu [Bulletin of the State Agroecological University]*, 1, 139–147 [in Ukrainian].

Stadnychenko, A.P., Boghachova, A.M., & Shubrat, Ju.V. (2007). Malakologhichni i parazytarni naslidky globalnykh zmin klimata Zemli [Malacological and parasitic consequences of global changes in the Earth's climate]. *Ekologhofaunistychni osoblyvosti vodnykh ta nazemnykh ekosystem [Ecological and faunal features of aquatic and terrestrial ecosystems]*. Lviv, pp. 159–162 [in Ukrainian].

Stadnychenko, A.P., & Ikonnikova, Ju.V. (2023) Adaptivni ekologho-fiziologhichni spromozhnosti ghenetychnykh aloydiv-vikariantiv *Planorbarius* (superspecies) *corneus* s. l. (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata, Planorbidae) ghidromerezhi Ukraïny [Adaptive ecological and physiological capabilities of genetic vicariant allospecies *Planorbarius* (superspecies) *corneus* s. l. (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata, Planorbidae) of the water network of Ukraine]. *Zbirnyk naukovykh prats "Biologhichni doslidzhennia – 2023" [Collection of scientific works "Biological research – 2023"]*. Zhytomyr, pp. 52–55 [in Ukrainian].

Baker, F.C. (1945). The molluscan family Planorbidae. *Univ. Illinois press*. Urbana [in English].

Garbar, D.A., & Garbar, O.V. (2005). Structure of the genus *Planorbarius* in the Ukrainian fauna. *Molluscs, Quaternary, faunal changes and environmental dynamics*. Prague, 13–14 [in English].

Grossu, A. (1956). Mollusca (Gastropoda: Pulmonata). *Acad. Rep. Popul. Romine. Bucuresti* [in English].

Linnaeus, C. (1758). *Systema naturae. Laurentii. Holmiae* [in English].

Régondaud, I. (1961). Development de la covité pulmonaire et de la covité palleale chez *Lymnaea stagnalis*. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 252, 173–181 [in English].

Отримано: 26.04.2024

Прийнято: 09.05.2024



УДК 502.211:582.091(477.5+477.51)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.6>

ІНВЕНТАРИЗАЦІЯ ТА ОЦІНКА ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ БАГАТОВІКОВИХ ДЕРЕВ МІСТА ЧЕРНІГОВА З ВИКОРИСТАННЯМ ІНСТРУМЕНТУ I-TREE ECO

С. О. Потоцька¹

Багатвікові дерева мають наукове, екологічне, історико-культурне значення та виконують важливі функції. Більшість об'єктів природно-заповідного фонду міста Чернігова створено у 60–70-і роки ХХ ст. та потребують вивчення сучасного стану, перегляду заходів по догляду й проведення лікування стовбурів, щоб запобігти подальшому їх руйнуванню. Актуальності набуває питання про екологічно вартісну цінність багатвікових дерев та оцінювання екосистемних послуг у грошових одиницях для подальших напрямків із збереження й розробки підходів догляду, лікування та використання з рекреаційною метою та ін.

Метою дослідження було здійснити комплексну оцінку й визначити екосистемні послуги багатвікових дерев у категорії ботанічна пам'ятка природи місцевого значення структури природно-заповідного фонду міста Чернігова (Лівобережне Полісся, Україна) при використанні інструменту i-Tree Eco.

Здійснено інвентаризацію ботанічних пам'яток природи місцевого значення природно-заповідного фонду м. Чернігова. За систематичною структурою 105 особин, які займають площу – 1,17 га, налічують 6 видів (*Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) Karst., *Larix decidua* Mill., *Quercus robur* L., *Tilia cordata* Mill. *Aesculus hippocastanum* L.), з 4 родин, з 2-х відділів (*Pinophyta*, *Magnoliophyta*). За життєвою формою найбільше налічується листопадних дерев першої величини (*Quercus robur*, 47 особин). Згідно екологічних особливостей переважають тіньлюбні види (49 особин) та світловибалливі види (48), за вибагливістю до вологості – мезофіти (104), за едафічними особливостями – мезотрофи (104), за морозостійкістю – морозостійкі (104). За віковими особливостями переважають групи дерев вік, яких понад 100 років (64 особи) та 250–400 років (37 особин), більшість багатвікових дерев мають охоронний статус, який їм надано з 1964 року та 1972 р. (11 груп). За життєвим станом більшість багатвікових дерев мають механічні пошкодження стовбурів, гілок, рани, спостерігається на листях борошниста роса та ін., їх віднесено до II категорії стану дерев (ослаблені, II бали) та III (дуже ослаблені, II-III бали). Під час дослідження фіксувалися пошкодження стовбурів, гілок від уламків ракет, які отримані багатвіковими деревами під час бойових дій, також зламані дерева (частково або повністю).

За результатами розрахунків сумарної вартості екосистемних послуг багатвікових дерев при використанні програмового інструменту i-Tree Eco за 20 років загальна сума налічує 30905,69 \$, 1231282,69 грн.

Для території міста Чернігова проведено інвентаризацію ботанічних пам'яток природи місцевого значення й вперше проаналізовано можливості й перспективи використання інструменту i-Tree

¹ кандидат біологічних наук
(Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка, м. Чернігів)
e-mail: s_pototska@ukr.net
ORCID: 0000-0002-3595-503X

Есо для об'єктів природно-заповідного фонду та визначено екосистемні послуги для 105 особин багатовікових дерев.

Практичний інтерес полягає у можливості використання інструменту i-Tree Eco для вдосконалення й покращення процесів під час проведення інвентаризації об'єктів природно-заповідного фонду. Визначення екосистемних послуг багатовікових дерев, які в більшості випадків не оцінені з економічної, соціальної, екологічної направленості, що має значний інтерес на державному й міжнародному рівнях, з метою надання подальших фінансувань заходів природоохоронного спрямування, збереження й лікування та ін.

Ключові слова: багатовікові дерева, ботанічна пам'ятка природи, інвентаризація, екосистемні послуги, I-Tree Eco, місто Чернігів, Лівобережне Полісся.

INVENTORY AND ASSESSING ECOSYSTEM SERVICES OF CENTURIES-OLD TREES OF THE CITY OF CHERNIHIV USING THE I-TREE ECO TOOL

S. O. Pototska

Centuries-old trees have scientific, ecological, historical and cultural significance and perform important functions. Most of the objects of the nature reserve fund of the city of Chernihiv were created in the 60s and 70s of the XXth century and need to be studied for their current condition, reviewed for maintenance measures and treatment of the trunks to prevent their further destruction. The issue of the ecological value of centuries-old trees and assessing ecosystem services in monetary terms for further preservation and development of approaches to care, treatment and recreational use, etc. is becoming topical. The purpose of the study was to carry out a comprehensive assessment and determine the ecosystem services of centuries-old trees in the category of botanical natural monument of local importance of the structure of the nature reserve fund of the city of Chernihiv (Left-Bank Polissia, Ukraine) using the i-Tree Eco tool.

An inventory of botanical natural monuments of local importance of the nature reserve fund of the city of Chernihiv was carried out. According to the systematic structure, 105 individuals occupying an area of 1.17 ha include 6 species (*Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) Karst., *Larix decidua* Mill., *Quercus robur* L., *Tilia cordata* Mill. *Aesculus hippocastanum* L.), from 4 families, from 2 divisions (Pinophyta, Magnoliophyta). The largest number of deciduous trees of the first size (*Quercus robur*, 47 individuals) is found in terms of life form. According to ecological features, shade-loving species (49 individuals) and light-demanding species (48) prevail, mesophytes (104) are demanding in terms of humidity, mesotrophs (104) are edaphic in terms of edaphic features, and frost-resistant (104) – in terms of frost-resistance. In terms of age characteristics, the groups of trees over 100 years old (64 individuals) and 250–400 years old (37 individuals) prevail, and most centuries-old trees have a protected status granted to them since 1964 and 1972 (11 groups). In terms of vital condition, most centuries-old trees have mechanical damage of trunks, branches, wounds, powdery mildew is observed on the leaves, etc., and they belong to the Category II (weakened, grade II) and the Category III (very weakened, grade II-III) of tree condition. During the study the damage of trunks and branches from missile fragments sustained by centuries-old trees during the hostilities, as well as broken trees (partially or completely) were recorded.

According to the results of calculations of the total value of ecosystem services of centuries-old trees using the i-Tree Eco software tool for 20 years, the total amount is \$30905.69, 1231282.69 UAH. For the territory of the city of Chernihiv, an inventory of botanical natural monuments of local importance was carried out and for the first time the possibilities and prospects of using the i-Tree Eco tool for nature reserve sites were analysed, and ecosystem services for 105 species of centuries-old trees were defined.

The practical interest lies in the possibility of using the i-Tree Eco tool to improve and enhance processes during the inventory of nature reserve fund objects. Determination of ecosystem services of centuries-old trees, which in most cases are not assessed from an economic, social, ecological perspective, which is of significant interest at the state and international levels, with the purpose of providing further funding for environmental protection measures, preservation and treatment, etc.

Key words: centuries-old trees, botanical natural monument, inventory, ecosystem services, i-Tree Eco, the city of Chernihiv, Left-bank Polissia.

Вступ

Збереження у системі охоронних територій дерев та в умовах культури забезпечує існуюча

мережа природно-заповідного фонду (далі ПЗФ) Чернігівської області (01.01.2024 р.), яка налічує 681 об'єкт, загальною площею

263316,5730 га. Вона виступає як сукупність природних територій та об'єктів, з них заказники (загальнодержавного значення (далі з.д.з.) – 12; 10421,68 га; місцевого значення (далі м.з.) – 448; 106230,8399 га), пам'ятки природи (з.д.з. – 7; 297,00 га; м.з. – 133; 570,940 га), національні природні парки (з.д.з. – 2; (частина площі на території Чернігівської області НПП «Залісся»); 41988,50 га), регіональні ландшафтні парки (м.з. – 3; 85045,35 га), заповідні урочища (м.з. – 53; 18163,7608 га), так і об'єктів колекційно-паркового типу, а саме дендрологічні (з.д.з. – 1; 204,70 га) та зоологічні (з.д.з. – 1; 9,00 га) парки, парки-пам'ятки садово-паркового мистецтва (з.д.з. – 1; 40,00 га; м.з. – 18; 332,9 га), які знаходяться під особливою охороною держави й формують національне багатство України та є складовими державних і регіональних схем екомережі (Objects...). Мережа ПЗФ міста Чернігова станом на 01.01.2024 р. налічує 24 об'єкти та території місцевого статусу, серед них 17 ботанічних пам'яток природи (це переважно вікові дерева, Старовинна ялинова алея), 2 гідрологічні пам'ятки природи (озера «Глушець» і «Магістрацьке»), лісовий заказник та регіональний ландшафтний парк «Ялівщина», 2 парки-пам'ятки садово-паркового мистецтва – «Болдині гори» і «Миський сад» та заповідне урочище «Святе» (Об'єкти...).

Багатовікові дерева як важлива складова екологічного стану міської території, мають наукове, екологічне, історико-культурне, естетичне, освітньо-виховне й туристичне значення. Багатовікові дерева є свідками минулих століть – це духовна спадщина, «меморіальна достовірність» минулого, вони показують минуле й майбутнє у сьогоденні. На урбанізованих територіях не приділяється значної уваги питанням щодо цінності екосистемних послуг (корисних благ) багатовікових дерев, які в більшості випадків не оцінені з економічних, соціальних, екологічних напрямків, також і в грошовому еквіваленті, не є монетизованими. На сьогодні весь перелік екосистемних послуг оцінити в повній мірі є неможливим, бо відсутні чіткі критерії та методики оцінки функцій насаджень, але концепція відносної вартості оплати корисних благ має значний інтерес на міжнародному рівні з метою подальшого фінансування заходів природоохоронного спрямування та ін. (Bidolakh et al., 2023).

Починаючи з 1950 р. та на початку 1960 р. відбулася перша Всеукраїнська

інвентаризація вікових дерев, було виявлено близько 1800 дерев довгожителів, з яких заповідано тільки кілька десятків (1964 р.), а під час другого етапу у період 1971–1972 рр. біля 100 вікових дерев було включено до природно-заповідного фонду (Karpenko & Pototska, 2012). В Україні дослідженнями та розробкою напрямків охорони багатовікових дерев займаються С. Івченко, С. Попович, Н. Таран, С. Стойко, П. Шубер, В. Савосько, Е. Євтушенко, А. Кушнір та ін. (Kushnir & Vakulyk, 2023). На території міста Чернігова дослідження багатовікових дерев проводяться науковцями Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка (Потоцька С.О., Карпенко Ю.О. та ін.) (Karpenko & Pototska, 2012).

Більшість об'єктів ПЗФ міста Чернігова створено у 60–70-і роки ХХ ст. та потребують вивчення сучасного стану, перегляду заходів по догляду й проведення відповідного лікування стовбурів і запобігання подальшому руйнуванню. Існуюча мережа ПЗФ не в повній мірі забезпечує систему охорони насаджень, тому актуальності набуває проведення комплексного дослідження стану багатовікових дерев міста Чернігова, що є необхідною передумовою для здійснення етапів міської «Програми розвитку, збереження та оптимізації зелених насаджень Чернігова», особливо після активних бойових дій у період війни. Також актуальності набуває питання про екологічно вартісну цінність багатовікових дерев на території урбоєкосистеми Чернігова та оцінювання екосистемних послуг при використанні інструменту i-Tree Eco (I-Tree Eco...) у грошових одиницях для подальших напрямків із збереження та розробки підходів догляду, лікування та використання з рекреаційною метою даних об'єктів та ін.

Метою дослідження було здійснити комплексну оцінку й визначити екосистемні послуги багатовікових дерев у категорії ботанічна пам'ятка природи місцевого значення структури природно-заповідного фонду міста Чернігова (Лівобережне Полісся, Україна) при використанні інструменту i-Tree Eco.

Об'єкт дослідження – ботанічні пам'ятки природи місцевого значення (багатовікові дерева) міста Чернігова, методологія проведення інвентаризації, вартісна оцінка екосистемних послуг.

Предмет дослідження – систематична структура, еколого-біологічні особливості, оцінювання екосистемних послуг багатові-

кових дерев (ботанічних пам'яток природи) міста Чернігова при використанні інструменту i-Tree Есо.

Програма досліджень включала наступні завдання: здійснення інвентаризації ботанічних пам'яток природи місцевого значення ПЗФ міста Чернігова, Чернігівської області (вивчення систематичної структури, вікових й кількісних, екологічних й біоморфологічних особливостей; визначення життєвого стану; оцінювання вартості екосистемних послуг при застосованні інструменту i-Tree Есо.

Матеріал і методи

В основу дослідження покладені матеріали польових досліджень, проведених автором протягом 2022–2024 рр. на території зеленої зони міста Чернігова.

Інвентаризацію багатвікових дерев міста Чернігова нами проведено згідно з (Інструкція ..., 2001), обстеження згідно із загальноприйнятими методиками. Під час дослідження було визначено: місцезнаходження, діаметр стовбура дерева – мірною вишкою на висоті 1,3 м; діаметр крони; висоту дерева (вертикальний кута на верхню і нижню частини стовбура); відстань між деревами – приладом Nikon Forestry Pro (висотомір, кутомір, далекомір). Вік дерева нами визначався за архівними матеріалами, переліком офіційної інформації та за допомогою вимірювання діаметра стовбура й використання спеціальних коефіцієнтів для розрахунків ($L=k*s$; де L – вік, k – коефіцієнт, s – довжина діаметру стовбура дерева на висоті 1,3 м від поверхні землі).

На рис. 1. нами наведено приклад одного з етапів під час проведення дослідження на території зеленої зони міста Чернігова та при використанні інструменту i-Tree Есо.

Оцінювання життєвого стану багатвікових дерев (у балах), прямизну стовбура (у балах), наявність пошкоджень, дуплистість та ін. нами визначалися за загальноприйнятими методами та згідно санітарних правил в Україні (Про затвердження ...). Біоморфологічний аналіз виконано на основі системи життєвих форм за І.Г. Серебряковим (1962) (Pototska, 2011), екологічні особливості визначалися за О.А. Калініченком (2003) (Kalinichenko, 2003; Pototska, 2011). У дослідженні номенклатуру таксонів та їх систематичне походження за «Vascular plants of Ukraine. A nomenclatural checklist» (Mosyakin & Fedoronchuk, 1999; Plants...), латинські назви дерев природної флори України наведено за визначниками рослин.

Оцінювання екологічних послуг багатвікових дерев здійснювали при використанні програмного забезпечення i-Tree Есо, яка розроблена лісовою службою Сполучених Штатів Америки та є адаптованою моделлю Urban Forest Effects (Bidolakh et al., 2023). Дослідження нами проводилося із залученням волонтерів – учнівсько-студенської молоді (Малинко Н., учень ліцею № 15, м. Чернігова та студенти спеціальності 101. Екологія Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка).

Використання та поєднання різних методів і методик забезпечило проведення інвен-



Рис. 1. Приклад проведення дослідження багатвікового дерева / дуб звичайний (*Quercus robur*), вулиця О. Довженка, 90, розрахунок екосистемних послуг при використанні інструменту i-Tree Есо

таризації, оцінювання екосистемних послуг, що забезпечить обґрунтування доцільності щодо збереження, охорони, лікування багатотовікових дерев міста Чернігова та необхідності збільшення фінансової підтримки щодо організації догляду за деревами.

Результати та обговорення

Згідно з фізико-географічним районуванням місто Чернігів (48°37'N22°18'E) знаходиться у регіоні Лівобережного Полісся, відповідно до «Геоботанічного районування» належить до Європейської широколистяної області, Східнополіського округу, Східно-Європейської провінції, Поліської підпровінції, Олишівсько-Коропського геоботанічного району (Національний ..., 2009). В орографічному відношенні територія дослідження розташована в східній частині Чернігівського Полісся, на Правобережжі річки Десни, у зоні сполучення її долини з Любеч-Чернігівською моренно-зандровою рівниною, в кліматичному відношенні територія належить до північно-західної підобласті Атлантично-континентальної лісової кліматичної області, ґрунти сформувалися на безкарбонатних піщаних та супіщаних відкладах, в умовах

середнього та частково значного зволоження, зональним типом ґрунтів є дерново-підзолисті та сірі опідзолені, поширеними також є сірі лісові лучні, дернові глибокі глейові ґрунти (Pototska, 2011).

Інвентаризація багатотовікових дерев категорії ботанічна пам'ятка природи місцевого значення у структурі ПЗФ міста Чернігова здійснювалася маршрутним методом, у ході якого визначалися у дерев (105 особин,) які займають площу – 1,17 га: вид; кількість, їх місцезростання; вік, діаметр стовбура, висота, площа, загальний життєвий стан, рік створення, розраховувалася вартість екологічних послуг у грошових одиницях за 20 років при використанні інструменту i-Tree Eco (долари, гривні).

Аналізуючи результати дослідження (табл. 1) за систематичною структурою ботанічні пам'ятки природи представлені 6 видами, 4 родинами, з 2 відділів.

За життєвою формою та видовим складом переважають дерева першої величини (листопадні та вічнозелені): *Quercus robur* (родина *Fagaceae*) – 47 особин; *Picea abies* (*Pinaceae*) – 27 особин; у меншій кілько-

Таблиця 1

Систематична структура та еколого-біологічні особливості

Видова назва	Життєва форма	Світлови-баганість	Гігроморфи	Вибаганість до ґрунту	Морозостійкість
Відділ Голонасінні (<i>Pinophyta</i>) <i>Pinaceae</i> Lindl. (Соснові)					
Сосна звичайна (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	ВД ₁	G-S	Ks	Ol	M
Ялина європейська (<i>Picea abies</i> (L.) Karst.)	ВД ₁	S	Ms	Mzt	M
Модрина європейська (<i>Larix decidua</i> Mill.)	ΛД ₁	G	Ms	Mzt	BM
Відділ Покритонасінні (<i>Magnoliophyta</i>) <i>Fagaceae</i> Dumort. (Букові)					
Дуб звичайний (<i>Quercus robur</i> L.)	ΛД ₁	G	Ms	Mzt	M
<i>Tiliaceae</i> Juss. (Липові)					
Липа серцелиста (<i>Tilia cordata</i> Mill.)	ΛД ₁	G-S	Ms	Mzt	M
<i>Hippocastanaceae</i> Torr. et Gray. (Гіркокаштанові)					
Гіркокаштан звичайний (<i>Aesculus hippocastanum</i> L.)	ΛД ₁	S	Ms	Mzt	M

Пояснення до таблиці 1: вічнозелені дерева – ВД, листопадні дерева – ΛД; дерева I величини (від 25 м і вище) – Д1; світлолюбні рослини – G, світлотіньвитривалі рослини – G-S, тіньлюбні рослини – S; ксерофіт – Ks, мезофіт – Ms; мезотроф – Mzt, оліготроф – Ol; морозостійкий – M, відносно морозостійкий – BM.

сті представлено *Aesculus hippocasranum* (*Hippocastanaceae*) – 22 особини, *Tilia cordata* (*Tiliaceae*) – 14 особин, а *Pinus sylvestris* та *Larix decidua* (*Pinaceae*) налічують по 1 особині.

За відношенням до освітлення переважають тіньолюбні види (S) – 49 особин (*Picea abies*, *Aesculus hippocasranum*); на другому місці світловибагливі види (G) – 48 особин (*Quercus robur*, *Larix decidua*); третю позицію займають світлотіньвитривалі види (G-S) – 15 особин (*Pinus sylvestris*, *Tilia cordata*). За відношенням до вологості переважають мезофіти (Ms), тобто види, які потребують середнього зволоження – 104 особини, у меншій кількості представлені ксерофіти (Ks) – посухостійкі рослини – *Pinus sylvestris* (1 особина). За едафічними особливостями переважають види мезотрофи (Mzt) 104 особини (мають середні показники щодо елементів живлення); невибагливими до ґрунтів є 1 особина (*Pinus sylvestris*), яка належить до групи оліготофів (Ol). За моро-

зостійкістю переважають види морозостійкі (M) – 104 особини, відносноморозостійким (BM) видом є одна особина *Larix decidua*.

За віком переважають групи дерев понад 100 років (64 особини), 250–400 років (37 особин), а 200 років (3 особини), 150 років (1 особина). Більшості ботанічних пам'яток місцевого значення (багатовіковим деревам) було надано охоронний статус 1964 р., 1972 р. (11 груп), 1989 р. (4) та 2017 р. (2).

У табл. 2, рис. 1 і 2 наведено результати дослідження. Нами визначався життєвий стан багатовікових дерев, при цьому фіксувалися пошкодження стовбурів, гілок, зокрема від уламків ракет під час активних бойових дій, зламані дерева (верхівки, та під час сильних вітрів, буревіїв та ін.).

Більшість груп дерев мають показник II бали (незначне механічне пошкодження кореневих стовбурів; рани, спостерігається борошниста роса та ін.) та II–III бали (поодинокі сухі скелетні гілки в різних частинах крони; механічні пошкодження стов-

Таблиця 2

Результати дослідження

Назва, вид, к-ть особин	Вік, діаметр стовбура (см), висота (м), середнє значення	Площа, га	Місце знаходження, рік створення	Пошкодження, загальний стан (у балах / б.)	Вартість екологічних послуг у грошовій одиниці за 20 років; середнє значення
Сосна Василя Ялоцького, <i>Pinus sylvestris</i> ; 1 особина	біля 150 р.; 143,0; 22,0	0,01	територія агробіостанції КЗ «Чернігівський обласний науковий ліцей»; 2017 р.	незначні, II б.	149,74 \$; 5 965,64 грн.
Вікові дерева бувшої садиби Г.М.Глібова, <i>Aesculus hippocasranum</i> , 22 особини	понад 100 р.; 120; 15,1	0,31	Території НУ «Чернігівська політехніка» (0,09 га); Інститут мікробіології (0,11 га); інформаційно-технологічний ліцей № 16 (0,11 га); 2017 р.	незначні, II б.	266,94 \$; 10 634,89 грн. 31 дерево = 8 275,14 \$; 329 681,59 грн.
<i>Tilia cordata</i> Mill., 14 особин	біля 100 р.; 98,8 21,0				
<i>Picea abies</i> , 4 особини	біля 100 р.; 100,0; 22,6				
<i>Larix decidua</i> , 1 особина	біля 100 р.; 71,0; 20,6				
31 особина					

Продовження таблиці 2

Багатовіковий дуб, <i>Quercus robur</i> , 1 особина	близько 400 р.; 235,0; 21,8	0,01	вул. О. Довженка, 90; 1964 р.	незначні, II б.	528,54 \$; 21 057,03 грн.
Багатовіковий дуб, <i>Quercus robur</i> , 1 особина	понад 200 р.; 115,0; 9,4	0,01	парк культури і відпочинку імені М. Коцюбинського; 1989 р.	незначні, II б.	413,27 \$; 16 464,68 грн.
Багатовіковий дуб, <i>Quercus robur</i> , 1 особина	понад 300 р.; 300,0; 20,3	0,01	м. Чернігів, вул. Олега Міхнюка, 45; 1989 р.	незначні, II б.	253,49 \$; 10 099,04 грн.
Багатовіковий дуб, <i>Quercus robur</i> , 1 особина	понад 250 р.; 180,0; 22,6	0,01	м заповідне урочище «Святе»; 1964 р.	майже не спостерігається, II б.	561,61 \$; 22 371,54 грн.
Багатовікові дуби, <i>Quercus robur</i> 2 особини	понад 250 р.; 210,0; 23,2	0,02	заповідне урочище «Святе»; 1964 р.	майже не спостерігається, II б.	540,20 \$; 21521,57 грн. 2 дерева = 1080,4 \$; 43 043,14 грн.
Багатовіковий дуб, <i>Quercus robur</i> , 1 особина	понад 200 р.; 200,0; 15,0	0,01	вул. Коцюбинського 20; 1989 р.	потребує догляду, пошкодження, III б.	552,78 \$; 22 022,0 грн.
Багатовіковий дуб, <i>Quercus robur</i> , 1 особина	понад 300 р.; 170,0; 20,8	0,01	вул. Магістратська, 19; 1972 р.	пошкодження є, але незначні, II б.	531,14 \$; 21 160,62 грн.
Віковий дуб, <i>Quercus robur</i> , 1 особина	понад 200 р.; 165,0; 20,1	0,01	вул. Василя Тарновського (Мар'їн гай); 1972 р.	потребують догляду, II б.	549,32 \$; 21 884,91 грн.
Віковий дуб, <i>Quercus robur</i> , 1 особина	250 р.; 150,0; 16,2	0,01	вул. Коцюбинського, 12 1989 р.	незначні, II б.	539,68 \$; 21 500,85 грн.
Група багатовікових дубів, <i>Quercus robur</i> 7 особин	300–400 рр.; 285,0; 22,3	0,07	парк пам'ятка садово-паркового мистецтва «Міський сад»; 1972 р.	деякі потребують догляду, II-III б.	251,40 \$; 10015,78 грн. 7 дерев = 251,40 \$; 70 110,46 грн.
Група багатовікових дубів, <i>Quercus robur</i> 3 особини	250–400 рр.; 220,0; 23,4	0,03	вул. Шевченка, 105; 1972 р.	незначні, II б.	573,19 \$; 22 835,88 грн. 3 дерева = 1 719,57 \$; 68 507,64 грн.
Група багатовікових дубів, <i>Quercus robur</i> 5 особин	250–400 рр.; 296,0; 24,0	0,05	вул. Шевченка, 95; 1972 р.	незначні, (уламкові пошкодження від ракет під час війни), III б.	314,09 \$; 12 513,35 грн. 5 дерев = 1 570,45 \$; 62 566,75 грн.

Продовження таблиці 2

Група багатовікових дубів, <i>Quercus robur</i> 4 групи дубів, 17 особин	300– 350 рр.; 159,0; 18,5	0,5	урочище «Маліїв рів»; 1972 р.	1 особину злаmano, потребують лікування, II–III б.	584,85 \$; 23 300,42 грн. 16 дерев = 9 357,6 \$; 372 806,72 грн. - 195,73 \$; - 7 797,88 грн. (1 дерево пошкоджено)
Група вікових насаджень, <i>Quercus robur</i> 5 особин	віком 250– 400 рр.; 270,0; 24,3	0,05	вул. Шевченка, 57; 1964 р.	деякі потребують догляду, II б.	532,79 \$; 21226,35 грн. 5 дерев = 2 663,95 \$; 106 131,75 грн.
Старовинна ялинова алея, <i>Picea abies</i> , 23 особин	понад 100 р.; 49,2;	0,05	вул. Шевченка, 54; 1964 р.	1 особину злаmano, потребують догляду, II–III б.	111,24 \$; 4431,80 грн. 22 особини = 2 447,28 \$; 97 499,6 грн. - 99,73 \$; - 3 973,24 грн. (1 дерево пошкоджено)
Усього 105 особин		1,17			30905,69 \$; 1231282,69 грн.

Пояснення до таблиці 2. Розрахунок показників валюти проводився за курсом НБУ (на даний час) 1 долар = 39,84 грн.

бура, гілок, кореневих лап, ураження листя борошнистою росю та ін.).

На рис. 2 наведено пошкодження багатовікових дерев уламками від ракет, які фіксувалися нами під час дослідження.

За результатами розрахунків сумарної вартості екологічних послуг за 20 років (діаметр стовбура, видова назва, загальний стан, освітленість, відстань до будівлі, вік, тип) досліджених нами багатовікових дерев при використанні програмового інструменту i-Tree Eco загальна сума налічує 30905,69 \$, 1231282,69 грн.

Висновки

За результатами комплексної оцінки багатовікових дерев міста Чернігова визначено, що систематична структура ботанічних пам'яток природи місцевого значення налічує 6 видів, які належать до 4 родин, 2 відділів. Виявлено 105 багатовікових дерев, які займають площу 1,17 га. Аналіз співвідно-

шення життєвих форм засвідчив переважання листопадних дерев першої величини (*Quercus robur*, 47 особин). За відношенням до освітлення переважають тінюлюбні (49 особин) і світловибагливі види (48), за гігморфністю – мезофіти (104), за едафічними особливостями – мезотрофи – 104 особини, за відношенням до температури – морозостійкі види (104 особини). Більшість багатовікових дерев мають вік понад 100 років (64 особини), 250–400 років (37 особин) та 200 років (3 особини), 150 років (1 особина). Офіційно охоронний статус віковим деревам здебільшого було надано з 1964 р. і 1972 р. (11 груп), але є ботанічні пам'ятки природи, які охороняються із 1989 р. (4) та 2017 р. (2). За життєвим станом багатовікові дерева віднесено до категорії стану дерев II – ослаблені (II бали) та III – дуже ослаблені (II–III бали), вони мають механічні пошкодження стовбурів, гілок, рани,



Рис. 2. Пошкодження уламками від ракетних бомбардувань стовбурів багатовікових дерев – ботанічних пам'яток природи місцевого природно-заповідного фонду, вул. Шевченка, 95 (5 особин)

враження борошністоросляними грибами. Зафіксовано пошкодження стовбурів і гілок від уламків ракет та в результаті активних бойових дій на території міста Чернігова, також зламані дерева (частково або повністю).

За результатами розрахунків при використанні програмового інструменту i-Tree Eco сумарної вартості екосистемних послуг багатовікових дерев за 20 років загальна сума сягає 30905,69 \$, 1231282,69 грн.

Список використаної літератури

Інструкція з технічної інвентаризації зелених насаджень у містах та селищах міського типу України. Київ : Держжитлокомунгосп, 2001. 26 с.

Калініченко О. Декоративна дендрологія : навч. посіб. Київ : Вища шк., 2003. 199 с.

Карпенко Ю., Потоцька С. Оптимізація природно-заповідної мережі міст Лівобережного Полісся (на прикладі м. Чернігова). *Науковий вісник Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія біологія*. 2012. № 1 (50). С. 67–71.

Кушнір А., Вакулик І. Цінність унікальних вікових дерев – пам'яток природи Біоресурси і природокористування. *Фахові видання Національного університету біоресурсів і природокористування України*. [Електронний ресурс]. URL: <https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Bio/article/view/bio2018.03.023> (дата звернення 20.04.2024).

Національний атлас України. Київ : ДНЗ «Картографія», 2009. 440 с.

Об'єкти ПЗФ Чернігівської області. *Департамент екології та природних ресурсів*. [Електронний ресурс]. URL: <https://eco.cg.gov.ua/index.php?id=16893&tp=1&pg=> (дата звернення 18.04.2024).

Оцінювання екосистемних послуг зелених насаджень з використанням інструменту i-Tree Eco / Д. І. Бідолах та ін. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2023. Т. 33, № 2. С. 7–13. <https://doi.org/10.36930/40330201> (дата звернення 19.04.2024).

Потоцька С. Природна і культивована дендрофлора міста Чернігова : дис. ... канд. біол. наук : 03.00.05. Київ, 2011. 435 с.

Про затвердження Санітарних правил в лісах України. *Офіційний вебпортал парламенту України*. [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-95-п#Text> (дата звернення 20.04.2024).

i-Tree Eco. *i-Tree Tools – Calculate the benefits of trees!* [Електронний ресурс]. URL: <https://www.itreetools.org/tools/i-tree-eco> (дата звернення 22.04.2024).

Mosyakin S.M., Fedoronchuk M. M. Vascular plants of Ukraine a nomenclatural checklist. Kiev : M. G. Kholodny Institute of Botany, 1999. 346 p.

Plants of the World Online | Kew Science. *Plants of the World Online*. [Електронний ресурс]. URL: <http://www.plantsoftheworldonline.org> (дата звернення 19.04.2024).

References (translated & transliterated)

Instrukcija z texničnoi inventaryzaciji zelenyx nasadžen' u mistax ta selyščax mis'koho typu Ukrajinny (2001) [Instruction on technical inventory of green spaces in cities and urban-type settlements of Ukraine]. Kyiv, Derzhzhylkomunhosp [in Ukrainian].

Kalinichenko, O. (2003). Dekoratyvna dendrolohija [Ornamental dendrology]. Kyiv : Vysha Shkola [in Ukrainian].

Karpenko, Yu., & Pototska, S. (2012). Optyimizacija pryrodno-zapovidnoji mereži mist Livoberežnoho Polissja (na prykladi m. Chernihova) [Optimization of the nature reserve network of cities of the Left-Bank Polissia (on the example of Chernihiv)]. *Naukovyj visnyk Ternopil's'koho nacional'noho pedahohičnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatjuka. Serija biolohija* [Scientific Bulletin of Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. Series Biology], 1 (50), 67–71 [in Ukrainian].

Kushnir, A., & Vakulyk, I. Cinnist' unikal'nyx vikovyx derev – pamjatok pryrody [The value of unique age-old trees – natural monuments]. *Bioresursy i pryrodokorystuvannja. Faxovi vydannja Nacional'noho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannja Ukrajinny* [Biological resources and nature management. Professional publications of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine]. [Electronic resource] URL: <https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Bio/article/view/bio2018.03.023> (access date 20.04.2024) [in Ukrainian].

Nacional'nyj atlas Ukrajinny (2009). [National Atlas of Ukraine]. DNZ «Kartografiya» [in Ukrainian].

Ob'jekty PZF Černihivs'koi oblasti [Objects of protected areas of Chernihiv region]. (b. d.). Departament ekolohiji ta pryrodnyx resursiv [Department of Ecology and Natural Resources. [Electronic resource] URL: <https://eco.cg.gov.ua/index.php?id=16893&tp=1&pg=> (access date 18.04.2024) [in Ukrainian].

Bidolakh, D.I., et al. (2003). Ocynjuvannja ekosystemnyx posluh zelenyx nasadžen' z vykorystannjam instrumentu i-Tree Eco [Evaluation of ecosystem services of green spaces using the i-Tree Eco tool]. *Scientific Bulletin of UNFU*, 33 (2), 7–13. <https://doi.org/10.36930/40330201> (access date 19.04.2024) [in Ukrainian].

Pototska, S. (2011). Pryrodna i kul'tyovovana dendroflora mista Černihova [Natural and cultivated dendroflora of the city of Chernihiv]. *Candidate's thesis*. Nacional'nyj botaničnyj sad imeni M. M. Hryška NAN Ukrajinny [M.M. Gryshko National Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Ukraine] [in Ukrainian].

Pro zatverdžennja Sanitarnyx pravyl v lisax Ukrajinny [On approval of sanitary rules in the forests of Ukraine]. (b. d.). Oficijnyj vebportal parlamentu Ukrajinny. [Electronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-95-p#Text> (access date 20.04.2024) [in Ukrainian].

I-Tree Eco. I-Tree Tools – Calculate the benefits of trees! [Electronic resource] URL: <https://www.itreetools.org/tools/i-tree-eco> (access date 22.04.2024) [in English].

Mosyakin, S.M., & Fedoronchuk, M.M. (1999). Vascular plants of Ukraine a nomenclatural checklist. M. G. Kholodny Institute of Botany [in English].

Plants of the World Online Kew Science. *Plants of the World Online*. [Electronic resource] URL: <http://www.plantsoftheworldonline.org> (access date 19.04.2024) [in English].

Отримано: 29.04.2024

Прийнято: 15.05.2024



УДК 595.324:574.58

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.7>

ФАУНА CLADOCERA (DIPLOSTRACA) ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ, УКРАЇНА

С. А. Сідоровський¹

Гіллястовусі ракоподібні (*Diplostraca*) є одним з важливих об'єктів гідробіологічного моніторингу, вони відіграють важливу роль у прісноводних екосистемах, оскільки виконують функцію біофільтраторів. Матеріалом для цієї роботи слугували 289 проб, що були зібрані автором з 2009 р. по 2023 р. у тимчасових і постійних водоймах Харківської області, а також літературні дані за період з 1925 р. по 2014 р. За допомогою детальних морфологічних досліджень було оцінено таксономічне різноманіття гіллястовусих ракоподібних Харківської області. Аналіз досліджених проб показав, що у водоймах Харківській області живе 56 видів з 33 родів і 9 родин надряду *Diplostraca*.

Найбільші відсотки у видовому складі фауни цієї області мають родини *Chydoridae* (46%) і *Daphniidae* (29%). Натомість нижчими показниками характеризується родини *Macrothricidae* (7%), *Bosminidae* (4%), *Sididae* (4%), *Euryceridae* (2%), *Moinidae* (2%), *Leptodoridae* (2%) і *Polyphemidae* (2%). Відсутність знахідок значної кількості планктонних ракоподібних, про яких повідомлялося в попередніх дослідженнях, може свідчити про зміни клімату або гідрологічного режиму. У підсумку слід зазначити, що водоймах Харківської області представлені родини та роди, які поширені в Палеарктиці.

Фауна гіллястовусих раків (*Cladocera*) Харківської області потребує подальшого вивчення. Від складу кладоцерової фауни значною мірою залежить оптимальне функціонування її екологічна рівновага гідроекосистем.

Ключові слова: зоопланктон, *Diplostraca*, *Crustaceans*, *Cladocera*, *Chydoridae*, *Daphniidae*, *Macrothricidae*, *Bosminidae*, *Sididae*, *Euryceridae*, *Moinidae*, *Leptodoridae* Гіллястовусі ракоподібні, Харківська область, Україна

CLADOCERAN (DIPLOSTRACA) FAUNA OF KHARKIV REGION, UKRAINE

S. A. Sidorovskiy

Cladocerans (Diplostraca) are important subjects of hydrobiological monitoring, playing a crucial role in freshwater ecosystems as biofilters. The material for this study consisted of 289 samples collected by the author from 2009 to 2023 in temporary and permanent water bodies of the Kharkiv region, as well as literary data from 1925 to 2014. Taxonomic diversity of cladocerans in the Kharkiv region was assessed through detailed morphological studies. Analysis of the examined samples revealed the presence of 56 species from 33 genera and 9 families of the superorder Diplostraca in water bodies

¹ аспірант, інженер,
кафедра зоології та екології тварин
(Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Харків)
e-mail: serge.sidorovsky@karazin.ua
ORCID: 0000-0002-3344-1457

of the Kharkiv region. The faunal composition of this region is predominantly represented by the families Chydoridae (46%) and Daphniidae (29%). On the other hand, lower percentages characterize the families Macrothricidae (7%), Bosminidae (4%), Sididae (4%), Euryercidae (2%), Moinidae (2%), Leptodoridae (2%), and Polyphemidae (2%). The absence of findings of a significant number of planktonic cladocerans reported in previous studies may indicate changes in climate or hydrological regime. In conclusion, it should be noted that the water bodies of the Kharkiv region are characterized by families and genera that are common in the Palaearctic. Further study of the cladoceran fauna of the Kharkiv region is needed. The composition of cladoceran communities significantly influences the optimal functioning and ecological balance of aquatic ecosystems.

Key words: Zooplankton, Diplostraca, Cladocera, Crustacea, Chydoridae, Daphniidae, Macrothricidae, Bosminidae, Sididae, Euryercidae, Moinidae, Leptodoridae Kharkiv region, Ukraine

Вступ

Збереження біологічного різноманіття вразливих зоопланктоценозів, які є ключовими компонентами трофічних ланцюгів гідроєкосистем, є однією з найактуальніших проблем гідробіології.

Гіллястовусі ракоподібні (надряд Diplostraca) є одним з важливих об'єктів гідробіологічного моніторингу, одне з завдань якого полягає у визначенні стану природних екосистем. Регіональні фауни водних екосистем вивчені недостатньо і вимагають особливої уваги для виконання рекомендацій Водної Рамкової Директиви ЄС (Directive 2000/60/ЄС), а також для забезпечення належної ефективності комплексного гідроекологічного моніторингу (Іванець, 2000; Тучапська, 2012; Трохимець, 2012; Іванець, 2013; Іванець, 2014).

Історія дослідження фауни Cladocera Харківської області має майже столітню історію. За всю історію дослідження у водоймах Харківської області виявлено 56 види Cladocera. Перший перелік гіллястовусих Харківської області був зроблений Г. Ф. Фадеєвим, професором Харківського інституту народної освіти (ХІНО) ім. О. Потебні (тепер Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна) у 1929 р. До переліку ввійшли знахідки гіллястовусих раків з басейну річки Сіверській Донець за 1917–1927 рр. У цій роботі наведено 46 видів (Сідоровський, 2012; Сідоровський, 2014; Władzki & Rybak, 2016).

У 1950 р. професор Харківського державного університету імені О. М. Горького (тепер Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна) Ю. А. Шкорбатова також приділяє увагу представникам Cladocera, але тільки з тимчасових водойм Харківської області басейну річки Сіверській Донець за 1946–1947 рр. У переліку Шкорбатова представлено 18 видів, з яких 6 видів, а саме *Coronatella rectangula* (G.O. Sars, 1862), *Macrothrix hirsuticornis* Norman & Brady,

1867, *Ceriodaphnia megops* G.O. Sars, 1862, *Ceriodaphnia laticaudata* P. E. Müller, 1867, *Daphnia cucullata* G. O. Sars, 1862 і *Moina brachiata* (Jurine, 1820) вказуються вперше для Харківської області (Сідоровський, 2012; Сідоровський, 2014; Władzki & Rybak, 2016).

У 1980–2011 рр. А. М. Колесник науковий співробітник Харківського державного університету імені О. М. Горького (тепер Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна) наводить дані про видове різноманіття зоопланктону Харківської області, де особливу увагу приділяв басейну річки Сіверській Донець та його притокам. Цей автор у своїх роботах для фауни Харківської області згадує 25 видів Cladocera, з яких 5 видів *Alona guttata* Sars, 1862; *Chidorus ovata* Kurz, 1874, *Oxyurella tenuicaudis* (G. O. Sars, 1862), *Bosmina coregoni* Baird, 1857 і *Ceriodaphnia pulchella* G. O. Sars, 1862 вказуються вперше для Харківської області (Колесник, 2014).

На даний час у літературі майже відсутня узагальнена інформація про дослідження таксономічної структури регіональних фаун гіллястовусих раків. Саме тому метою цієї роботи було проаналізувати структуру таксонів кладоцероценозів Харківської області України.

Матеріал і методи

У даній роботі представлені результати аналізу структури Cladocera, Харківської області. Матеріал збирали з травня по листопад 2009–2023 рр. у тимчасових і постійних водоймах Харківської області, Україна. Зібрали та опрацювали 389 проб з ракоподібними. Також проведено огляд літературних даних за період з 1925–2014 рр.

Відбір і обробку проб здійснювали за загальноприйнятими методиками. Матеріал фіксували у 76% розчині спирту або 4% розчині формаліну. Класифікацію наведено за Мартін та Дейвіс (Martin & Davis, 2001) з урахуванням змін 2013 р. (Olesen & Richter, 2013). Отримані результати поточ-

них досліджень опубліковані в низці робіт (Сідоровський, 2012; Сідоровський, 2014).

Результати та обговорення

Таксономічну структуру Cladocera Харківської області України представлено в таблиці 1. Наведено дані про знахідки Г. Ф. Фадєєва, Ю. Л. Шкорбатова і А. М. Колесникова в Харківській області, а також нові дані отримані автором.

Встановлено, що у водоймах Харківській області за всю історію її дослідження знаходили 56 видів гіллястовусих ракоподібних (надряд Diplostraca) з 33 родів і 9 родин. До родини Chydoridae належать 27 видів (46%), до родини Daphniidae – 16 видів (29%), до родини – Macrothricidae 4 види (7%), до родини Bosminidae – 2 види (4%), до родини

Moinidae – 2 види (4%), до родини Sididae – 2 види (4%), до родини Eurycercidae – 1 вид (2%), до родини Leptodoridae – 1 вид (2%) і до родини Polyphemidae – 1 вид (2%). Зареєстрований видовий комплекс характерний для помірних широт (Іванець, 2000; Іванець 2013).

Серед вказаних Г. Ф. Фадєєвим у 1925 р. для Харківської області 46 видів Cladocera 14 видів не знаходили (табл. 1) з тих часів понад 80 років (Фадєєв, 1925). Серед таких видів у родині Chydoridae – 11 видів: *Alona protzi* Hartwig, 1900; *Alonella exigua* (Lilljeborg, 1853); *Camptocercus lilljeborgi* Schödler, 1862; *Camptocercus rectirostris* Schödler, 1862; *Dunhevedia crassa* King, 1853; *Graptoleberis testudinaria* (Fischer,

Таблиця 1

Порівняння знахідок представників Cladocera в Харківській згідно з даними Г. Ф. Фадєєва (1917–1927), А. М. Колесника (1970–2014) і результатами автора (2009–2023). Присутність вида «+» відсутність «-»

	Фадєєв Г.Ф. 1917–1927 рр.	Шкорба- тов Ю. Л. 1946– 1947 рр.	Колес- ник А.М. 1970–2014 рр.	Сідоров- ський С.А. 2009–2023 рр.
Родина Chydoridae Dybowski & Grochowski, 1894				
<i>Acroperus harpae</i> (Baird, 1834)	+	+	+	+
<i>Alona affinis</i> (Leydig, 1860)	+	-	+	+
<i>Alona guttata</i> Sars, 1862	-	-	+	+
<i>Alona protzi</i> Hartwig, 1900	+	-	-	-
<i>Alona quadrangularis</i> (O. F. Müller, 1776)	+	-	-	+
<i>Alonella excisa</i> (Fischer, 1854)	+	+	-	-
<i>Alonella exigua</i> (Lilljeborg, 1853)	+	-	-	-
<i>Camptocercus lilljeborgi</i> Schödler, 1862	+	-	-	-
<i>Camptocercus rectirostris</i> Schödler, 1862	+	-	-	-
<i>Chidorus ovata</i> Kurz, 1874	-	-	+	+
<i>Chydorus sphaericus</i> (O. F. Müller, 1776)	+	+	+	+
<i>Coronatella rectangula</i> (G. O. Sars, 1862)	-	+	+	-
<i>Disparalona rostrata</i> (Koch, 1841)	+	+	-	+
<i>Dunhevedia crassa</i> King, 1853	+	-	-	-
<i>Graptoleberis testudinaria</i> (Fischer, 1851)	+	-	-	-
<i>Kurzia latissima</i> (Kurz, 1875)	+	+	-	-
<i>Leydigia leydigi</i> (Schödler, 1863)	+	+	-	-
<i>Monospilus dispar</i> G. O. Sars, 1862	+	-	-	-
<i>Oxyurella tenuicaudis</i> (G. O. Sars, 1862)	-	-	+	+
<i>Paralona pigra</i> G. O. Sars, 1862	+	-	-	-
<i>Peracantha truncata</i> (O. F. Müller, 1785)	+	+	-	-
<i>Picripleuroxus laevis</i> (G. O. Sars, 1862)	+	-	-	-
<i>Pleuroxus aduncus</i> (Jurine, 1820)	+	-	-	-
<i>Pleuroxus trigonellus</i> (O. F. Müller, 1776)	+	+	+	+

Продовження таблиці 1

<i>Pleuroxus uncinatus</i> (Baird, 1850)	+	–	–	–
<i>Pseudochydorus globosus</i> (Baird, 1843)	+	–	–	–
<i>Tretocephala ambigua</i> (Lilljeborg, 1901)	+	+	–	+
Родина Bosminidae Baird, 1845				
<i>Bosmina coregoni</i> Baird, 1857	–	–	+	+
<i>Bosmina longirostris</i> (O. F. Müller, 1785)	+	+	+	+
Родина Macrothricidae Norman & Brady, 1867				
<i>Bunops serricaudata</i> (Daday, 1884)	+	–	–	+
<i>Lathonura rectirostris</i> (O. F. Müller, 1785)	+	+	–	–
<i>Macrothrix hirsuticornis</i> Norman & Brady, 1867	–	+	+	+
<i>Macrothrix laticornis</i> (Jurine, 1820)	+	–	–	–
Родина Daphniidae Straus, 1820				
<i>Ceriodaphnia dubia</i> Richard, 1894	+	+	+	+
<i>Ceriodaphnia pulchella</i> G. O. Sars, 1862	–	–	+	+
<i>Ceriodaphnia quadrangula</i> (O. F. Müller, 1785)	+	–	–	–
<i>Ceriodaphnia reticulata</i> (Jurine, 1820)	+	–	+	+
<i>Ceriodaphnia megops</i> G. O. Sars, 1862	–	+	–	–
<i>Ceriodaphnia laticaudata</i> P. E. Müller, 1867	–	+	–	–
<i>Ceriodaphnia rotunda</i> (Straus, 1820)	+	+	+	–
<i>Ceriodaphnia setosa</i> Matile, 1890	+	–	–	+
<i>Daphnia cucullata</i> G. O. Sars, 1862	–	+	+	+
<i>Daphnia longispina</i> (O. F. Müller, 1776)	+	+	+	+
<i>Daphnia magna</i> Straus, 1820	+	+	+	+
<i>Daphnia pulex</i> Leydig, 1860	+	+	+	+
<i>Scapholeberis aurita</i> (Fischer, 1849)	+	+	–	–
<i>Scapholeberis mucronata</i> O. F. Müller, 1776	+	+	+	–
<i>Simocephalus exspinosus</i> (De Geer, 1778)	+	+	–	+
<i>Simocephalus vetulus</i> (O. F. Müller, 1776)	+	+	+	+
Родина Sididae Baird, 1850				
<i>Diaphanosoma brachyurum</i> (Liévin, 1848)	+	+	+	+
<i>Sida crystallina</i> (O.F. Müller, 1776)	+	–	+	+
Родина Eurycercidae Kurz, 1875				
<i>Eurycercus lamellatus</i> (O. F. Müller, 1776)	+	+	–	+
Родина Leptodoridae Lilljeborg, 1861				
<i>Leptodora kindtii</i> (Focke, 1844)	+	–	+	+
Родина Moinidae Goulden, 1968				
<i>Moina micrura</i> Kurz, 1875	+	–	+	+
<i>Moina brachiata</i> (Jurine, 1820)	–	+	–	+
Родина Polyphemidae Baird, 1845				
<i>Polyphemus pediculus</i> (Linnaeus, 1761)	+	–	–	–

1851); *Monospilus dispar* G.O. Sars, 1862; *Picripleuroxus laevis* (G.O. Sars, 1862); *Pleuroxus aduncus* (Jurine, 1820); *Pleuroxus uncinatus* (Baird, 1850); *Pseudochydorus globosus* (Baird, 1843). У родині Macrothricidae – 1 вид: *Macrothrix laticornis* (Jurine, 1820). У родині Daphniidae – 1 вид: *Ceriodaphnia quadrangula* (O.F. Müller, 1785). У родині Polyphemidae – 1 вид: *Polyphemus pediculus* (Linnaeus, 1761).

Також серед представників планктонних ракоподібних інших груп, таких як Calanoida і Cyclopoida, про які повідомляв знаходив Г. Ф. Фадєєв, є види, які не знаходили понад 80 років – 5 видів Calanoida і 19 видів Cyclopoida (Сідоровський, 2012; Сідоровський, 2013а; Сідоровський, 2013b).

Крім того, не було нових знахідок гіллястувусих *Ceriodaphnia megops* G. O. Sars,

1862 і *Ceriodaphnia laticaudata* P. E. Müller, 1867, про які повідомляв Ю. А. Шкорбатов для тимчасових водойм Харківської області (Сідоровський, 2012; Сідоровський, 2014; Wlędzki & Rybak, 2016).

За останні 20 років в постійних і тимчасових водоймах Харківської області знаходили 33 види Cladocera, які належать до 18 родів і 8 родин інфроряду Cladocera. До родини Chydoridae – 11 видів (33%), до родини Daphniidae – 12 видів (37%), до родини Macrothricidae – 2 види (6%), до родини Bosminidae – 2 види (6%), до родини Moinidae – 2 види (6%), до родини Sididae – 2 види (6%), до родини Eurycercidae – 1 вид (3%), до родини Leptodoridae – 1 вид (3%). Представників родини Polyphemidae не було знайдено.

Відсутність знахідок значної кількості планктонних ракоподібних може свідчити про зміни клімату або гідрологічного режиму внаслідок будівництва Кочетокського водосховища, що створили в 1936 р., на місці якого протягом 1958–1962 рр. побудували Печенізьке водосховище (Паламарчук і Закорчевна, 2001).

Фауна гіллястовусих раків цього регіону потребує подальшого вивчення. Від характеристик кладоцероценозів значною мірою залежать оптимальне функціонування

й екологічна рівновага гідроекосистем Європейського вододілу.

Висновки

Отже, у водоймах Харківській області за всю історію їх дослідження знаходили 56 видів, які належать до 32 родів, 9 родин інфроряду Cladocera. До родини Chydoridae належать 27 видів (51%), до родини Daphniidae – 14 видів (23%), до родини Macrothricidae – 4 види (23%), до родини Bosminidae і родини Sididae – по 2 види (4%) і по 1 виду (2%) до родин Eurycercidae, Leptodoridae, Moinidae і Polyphemidae. Гіллястовусі раки представлені літорально-фітофільними, пелагічними і еврибіонтними формами. Зареєстрований у водоймах видовий комплекс характерний для помірних широт. Відсутність великої кількості планктонних ракоподібних може бути вказівкою на зміни в кліматичних або гідрологічних умовах, ймовірно, зумовлених будівництвом Кочетокського водосховища у 1936 році та його заміною на Печенізьке водосховище у 1958–1962 роках.

Фауна гіллястовусих раків (Cladocera) Харківської області потребує подальшого вивчення. Від складу кладоцероценозів значною мірою залежать оптимальне функціонування й екологічна рівновага гідроекосистем.

Список використаної літератури

- Іванець О.Р. Біоценотичні комплекси зоопланктону в умовах антропогенного впливу. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2000. Вип. 10. № 3 С. 275–279.
- Іванець О.Р. Таксономічна структура кладоцероценозів Українського Розточчя. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2014. Вип. 64. С. 260–269.
- Іванець О.Р. Фауна гіллястовусих раків (Crustacea, Cladocera) Українського Розточчя. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2013. Вип. 63. С. 110–117.
- Колесник А.М. Зоопланктон водних об'єктів, розташованих на території Дворічанського національного парку. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: Біологія*. 2014. № 19. С. 30–35.
- Паламарчук М.М., Закорчевна Н.Б. Водний фонд України: Довідниковий посібник. К.: Ніка-Центр, 2001. 392 с.
- Сідоровський С.А. Фауна ракоподібних (Crustacea) НПП «Дворічанський», Харківська область. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія: Біологія*. 2014. № 19. С. 41–45.
- Сідоровський С.А. Calanoida (Copepoda) Харківської області. *Біологічний вісник Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького*. 2013а. Т. 1. № 7. С. 106–112. [https://doi.org/10.7905/bbmspu.v0i1\(7\).563](https://doi.org/10.7905/bbmspu.v0i1(7).563).
- Сідоровський С.А. Фауна ракоподібних (Crustacea) і коловерток (Rotifera) НПП «Гомільшанські ліси». *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія: Біологія*. 2012. № 16. С. 105–109.
- Сідоровський С.А. Cyclopoida (Maxillopoda) Харківської області. *Біологічний вісник Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького*. 2013б. Т. 2. №8. С. 280–288. [https://doi.org/10.7905/bbmspu.v0i3\(6\).543](https://doi.org/10.7905/bbmspu.v0i3(6).543).
- Трохимець В.М. Літоральний зоопланктон середньої частини Канівського водосховища. *Рибогосподарська наука України*. 2012. № 2. С. 14–23.

Тучапська А.Я. Оцінка розвитку зоопланктону вирощувальних ставів при інтродукції гіллястовусих ракоподібних. *Рибогосподарська наука України*. 2012. № 3–4. С. 103–106.

Błędzki L.A., Rybak J.I. Freshwater Crustacean Zooplankton of Europe. Cladocera & Copepoda (Calanoida, Cyclopoida) Key to species identification, with notes on ecology, distribution, methods and introduction to data analysis. *Springer International Publishing*, 2016. 918 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29871-9>.

Martin J.W., Davis G.E. An updated classification of the recent Crustacea. *Natural History Museum of Los Angeles County, Contributions in Science*. 2001. № 39. P. 124.

Olesen J., Richter S. Onychocaudata (Branchiopoda: Diplostraca), a New High-Level Taxon in Branchiopod Systematics. *Journal of Crustacean Biology*. 2013. Volume 33. Issue 1. P. 62–65. <https://doi.org/10.1163/1937240X-00002121>.

References (translated & transliterated)

Ivanets, O.R. (2000). Biotsenotychni kompleksi zooplanktonu v umovakh antropohennoho vplyvu [Biocenotic complexes of zooplankton under conditions of anthropogenic influence]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy [Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine]*, Vyp. 10, 3, 275–279 [in Ukrainian].

Ivanets, O.R. (2013). Fauna hiliastovusykh rakiv (Crustacea, Cladocera) Ukrainського Roztochchia [Fauna of branchiopod crustaceans (Crustacea, Cladocera) of the Ukrainian Roztochchia]. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Serii biologichna [Bulletin of Lviv University. Series Biology]*, 63, 110–117 [in Ukrainian].

Ivanets, O.R. (2014). Taksonomichna struktura kladotserotsenoziv Ukrainського Roztochchia [Taxonomic Structure of Cladoceran Communities in the Ukrainian Roztochchia]. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Serii biologichna [Bulletin of Lviv University. Series Biology]*, 64, 260–269 [in Ukrainian].

Kolesnyk, A.M. (2014). Zooplankton vodnykh ob'ektiv, roztaшовanykh na terytorii Dvorichanskoho natsionalnogo parku [Zooplankton of Water Bodies Located within the Territory of the Dvorichansky National Park]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnogo universytetu imeni V. N. Karazina. Serii: Biologiia [The Journal of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series «Biology»]*, 19, 30–35 [in Ukrainian].

Palamarchuk, M.M., & Zakorchevna, N.B. (2001). Vodnyi fond Ukrainy: Dovidnykovyi posibnyk [Water Resources of Ukraine: Handbook]. Kyiv: Nika-Center, 392 p. [in Ukrainian].

Sidorovsky, S.A. (2014). Fauna rakopodibnykh (Crustacea) NPP «Dvorichanskyi», Kharkivska oblast [Fauna of Crustaceans (Crustacea) in the Dvorichansky Nature Reserve, Kharkiv Region]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnogo universytetu imeni V. N. Karazina. Serii: Biologiia [The Journal of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series «Biology»]*, 19, 41–45 [in Ukrainian].

Sidorovsky, S.A. (2013a). Calanoida (Copepoda) Kharkivskoi oblasti [Calanoida (Copepoda) of Kharkiv Region]. *Biologichnyi visnyk Melitopolskoho derzhavnogo pedahohichnogo universytetu imeni Bohdana Khmelnytskoho [Biological Bulletin of Melitopol State Pedagogical University named after Bohdan Khmelnytskyi]*, Vol. 1, № 7, 106–112. [http://dx.doi.org/10.7905/bbmsspu.v0i1\(7\).563](http://dx.doi.org/10.7905/bbmsspu.v0i1(7).563) [in Ukrainian].

Sidorovsky, S.A. (2012). Fauna rakopodibnykh (Crustacea) NPP «Dvorichanskyi», Kharkivska oblast [Fauna of Crustaceans (Crustacea) and Rotifers (Rotifera) in the Homilshanski Forest Nature Reserve]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnogo universytetu imeni V. N. Karazina. Serii: Biologiia [The Journal of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series «Biology»]*, 16, 105–109 [in Ukrainian].

Sidorovsky, S.A. (2013b). Cyclopoida (Maxillopoda) Kharkivskoi oblasti [Cyclopoida (Maxillopoda) of Kharkiv Region]. *Biologichnyi visnyk Melitopolskoho derzhavnogo pedahohichnogo universytetu imeni Bohdana Khmelnytskoho [Biological Bulletin of Melitopol State Pedagogical University named after Bohdan Khmelnytskyi]*, Vol. 2, No. 8, 280–288. [http://dx.doi.org/10.7905/bbmsspu.v0i3\(6\).543](http://dx.doi.org/10.7905/bbmsspu.v0i3(6).543) [in Ukrainian].

Trokhymets, V.M. (2012). Litoralnyi zooplankton serednoi chastyny Kanivskoho vodoskhovyshcha [Littoral Zooplankton of the Middle Part of the Kaniv Reservoir]. *Rybohospodarska nauka Ukrainy [Fisheries Science of Ukraine]*, 2, 14–23 [in Ukrainian].

Tuchapska, A.Ya. (2012). Otsinka rozvytku zooplanktonu vyroshchuvalnykh staviv pry introduktsii hiliastovusykh rakopodibnykh [Assessment of zooplankton development in fish farming ponds with the introduction of branchiopod crustaceans]. *Rybohospodarska nauka Ukrainy [Fisheries Science of Ukraine]*, 3–4, 103–106 [in Ukrainian].

Błędzki, L.A., & Rybak, J.I. (2016). Freshwater Crustacean Zooplankton of Europe. Cladocera & Copepoda (Calanoida, Cyclopoida). Key to species identification, with notes on ecology, distribution,

methods and introduction to data analysis. *Springer International Publishing*, 918 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29871-9> [in English].

Martin, J.W., & Davis, G.E. (2001). An updated classification of the recent Crustacea. *Natural History Museum of Los Angeles County, Contributions in Science*, 39, p. 124 [in English].

Olesen, J., & Richter, S. (2013). Onychocaudata (Branchiopoda: Diplostraca), a New High-Level Taxon in Branchiopod Systematics. *Journal of Crustacean Biology*, 33, Is. 1, pp. 62–65. <https://doi.org/10.1163/1937240X-00002121> [in English].

Отримано: 18.03.2024
Прийнято: 24.04.2024



УДК 612.13

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.8>

ВПЛИВ ГРАДУЙОВАНОЇ ПАСИВНОЇ ОРТОПРОБИ НА ГЕМОДИНАМІКУ ЗДОРОВИХ ЧОЛОВІКІВ З РІЗНИМ РІВНЕМ ВЕГЕТАТИВНОГО ТОНУСУ

Р. А. Циганник¹, С. О. Коваленко²

Проявом загальнобіологічної закономірності реактивності є здатність серцево-судинної системи людини змінювати параметри своєї діяльності відповідно до змін умов зовнішнього середовища. Разом з цим для біологічних систем в цілому та гемодинаміки зокрема характерна мінливість. Тому дослідження змін гемодинаміки на стандартні навантаження у осіб різних типологічних особливостей вегетативної регуляції є актуальною проблемою біології та має практичне значення для створення оптимальних умов життєдіяльності людини. Метою роботи було дослідити особливості змін центральної гемодинаміки при пасивній градуальній ортопробі у здорових чоловіків з різним рівнем вегетативного тонусу. Вимірювання артеріального тиску, серцевого викиду, фазового аналізу серцевого тиску здійснювали при градуальній (15°, 30°, 45°, 60°) пасивній ортопробі та у період відновлення після неї на 76 здорових молодих чоловіках віком 18–25 років.

Показники серцевої діяльності реєстрували методами електрокардіографії та торакальної реографії. Рівень вегетативного тонусу оцінювали за варіабельністю серцевого ритму. У здорових молодих чоловіків з різним вихідним рівнем вегетативного тонусу спостерігали відмінності і в рівнях артеріального тиску, серцевого викиду, кардіодинаміки, кровонаповнення органів грудної клітки та, в особливості, тривалості інтервалу RR в спокої лежачи. Показано, що вихідний рівень вегетативного тонусу суттєво впливає на зміни показників центральної гемодинаміки при градуйованій пасивній ортопробі. Реактивність показників гемодинаміки при куті нахилу 60° пасивної ортопроби залежать від вихідного рівня вегетативного тонусу і найбільші у парасимпатотоніків. Вперше проаналізовані особливості реактивності серцево-судинної системи людини на пасивну ортопробу в залежності від вихідного рівня вегетативного тонусу. Виявлені в дослідженні закономірності дозволять збільшити діагностичну цінність тесту пасивної ортопроби та його використання в реабілітації

Ключові слова: пасивна ортопроба, центральна гемодинаміка, вегетативний тонус, варіабельність серцевого ритму.

¹ аспірант кафедри анатомії, фізіології та фізичної реабілітації
(Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси)
e-mail: roma.tsygannyk@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7955-7343

² доктор біологічних наук, професор,
професор кафедри спортивних дисциплін
(Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси)
e-mail: kovstas@ukr.net
ORCID: 0000-0002-4631-0464

EFFECT OF GRADED PASSIVE ORTHOTICS ON HAEMODYNAMICS OF HEALTHY MEN WITH DIFFERENT LEVELS OF AUTONOMIC TONE

R. A. Tsygannyk, S. O. Kovalenko

The ability of the human cardiovascular system to change the parameters of its activity in accordance with changes in environmental conditions is a manifestation of the general biological law of reactivity. At the same time, biological systems in general and haemodynamics in particular are characterised by variability. Therefore, the study of changes in haemodynamics to standard loads in individuals with different typological features of autonomic regulation is an urgent problem of biology and is of practical importance for creating optimal conditions for human life. The aim of the study was to investigate the peculiarities of changes in central haemodynamics during tilt-test in healthy men with different levels of autonomic tone. Measurements of blood pressure, cardiac output, and phase analysis of heart pressure were performed during a graded (15°, 30°, 45°, 60°) passive orthotics test and during the recovery period after it in 76 healthy young men aged 18-25 years. Cardiac performance was recorded by electrocardiography and thoracic rheography. The level of autonomic tone was assessed by heart rate variability. In healthy young men with different baseline levels of autonomic tone, differences were observed in the levels of blood pressure, cardiac output, cardiovascular dynamics, chest blood filling and, in particular, the duration of the RR interval at rest lying down. It has been shown that the initial level of autonomic tone significantly affects changes in central haemodynamics during tilt test. The reactivity of haemodynamic parameters at an inclination angle of 60° of the passive orthopaedic test depends on the initial level of autonomic tone and is highest in parasympathotonics. For the first time, the peculiarities of the reactivity of the human cardiovascular system to passive orthotics were analysed depending on the initial level of autonomic tone. The regularities revealed in the study will increase the diagnostic value of the tilt test and its use in rehabilitation.

Key words: tilt test, central haemodynamics, autonomic tone, heart rate variability.

Вступ

Реактивність в біологічних системах відноситься до здатності живих організмів, клітин або біомолекул взаємодіяти з іншими речовинами або подразниками (Islam, 2017). Проявом загальнобіологічної закономірності реактивності є здатність серцево-судинної системи людини змінювати параметри свого функціонування відповідно до змін умов зовнішнього середовища (Lattanzi et al., 2023; Gómez-Medina et al., 2023). Разом з цим для біологічних систем в цілому та гемодинаміки зокрема характерна мінливість, котра за думкою М.Ф. Ковтуна (2018) визначається як кількісні варіації ознак чи параметрів структур, об'єктів, явищ у межах системи однієї якості чи рівня організації. Тому дослідження змін гемодинаміки на стандартні навантаження у осіб різних типологічних особливостей автономної регуляції є актуальною проблемою біології та має практичне значення для створення оптимальних умов життєдіяльності людини.

Робота виконана в межах теми з держреєстрацією «Індивідуальні особливості змін центральної та периферійної гемодинаміки при різних впливах» (№0122U201052).

У сучасній літературі наявна велика кількість досліджень впливу активної ортопроби на гемодинаміку та хвильові її прояви, виконаних в вимірюваннях на різних кон-

тингентах здорових осіб (Коваленко, 2017; Андрощук та ін., 2021). Також велика кількість публікацій присвячена впливу тілт-тесту (пасивної зміни положення тіла догори головою) на гемодинаміку у осіб з вегетативними порушеннями (Jelavić et al., 2015; Cheshire & Goldstein, 2019; Aponte-Becerra & Novak, 2021; Sutton et al., 2021; White et al., 2021).

Також досліджені особливості змін центральної гемодинаміки у осіб з різним рівнем вегетативного тону при пневмокомпресії нижніх кінцівок (Shesterina et al., 2023). Втім аналізу впливу градуальної пасивної ортопроби на кровообіг людей в залежності від рівня вегетативного тону проведено не було. Разом з цим дослідження та врахування індивідуальних відмінностей реактивності серцево-судинної системи на пасивну (за умов виключення скорочення м'язів нижніх кінцівок) ортопробу може підвищити діагностичну цінність такого тесту, а також покращити профілактику порушень здоров'я людини.

Мета роботи – дослідити особливості змін центральної гемодинаміки при пасивній градуальній ортопробі у здорових чоловіків з різним рівнем вегетативного тону.

Матеріал і методи

У вимірюваннях взяли участь 76 чоловіків – студенти Черкаського національного

університету імені Богдана Хмельницького з дотриманням основних біоетичних положень Конвенції Ради Європи про права людини та біомедицину (від 04.04.1997 р.), Гельсінської декларації Всесвітньої медичної асоціації про етичні принципи проведення наукових медичних досліджень за участю людини (1994–2008 рр.), а також наказу МОЗ України № 690 від 23 вересня 2009 року.

Всі вони за даними медичного обстеження були здорові, не мали гострих та хронічних захворювань.

Спочатку на кінцівки та грудну клітку обстежуваного накладали реографічні та електрокардіографічні електроди, манжету для вимірювання артеріального тиску. Після відпочинку в положенні лежачи горизонтально на ортостатичному столі упродовж 5–10 хвилин вимірювали показники гемодинаміки. Вимірювання повторювали на 5-й хвилині після нахилу на 15°, 30°, 45°, 60° та на 20-й хвилині при нахилі 60°, через 5 хвилин після повернення у горизонтальне положення.

Систолічний ($AT_{\text{сис.}}$) та діастолічний ($AT_{\text{диаст.}}$) артеріальний тиск вимірювали за допомогою тонометра Короткова (Reiker, Germany). Середній артеріальний тиск розраховували за формулою Хікема. Для оцінки гемодинамічних показників використовували трансторакальну тетраполярну імпедансну реоплетизмографію. Реоплетизмограму грудної клітки реєстрували на реографі ХАІ-medica standard (ХАІ-medica, Харків, Україна). За сигналами диференційованої реограми грудної клітки та електрокардіограми в програмі цього розробника розраховували наступні показники центральної гемодинаміки.

Тривалість інтервалу RR (t-RR) – відстань між найвищими ділянками зібців R сусідніх кардіоінтервалів.

Ударний індекс (UI) знаходили шляхом поділу ударного об'єму крові на площу поверхні тіла. Ударний об'єм розраховували за методом Kubichek (Kubichek et al., 1970).

Серцевий індекс (CI) знаходили шляхом поділу хвилинного об'єму крові на площу поверхні тіла.

З показників кардіодинаміки оцінювали наступні: тривалість фази вигнання ($T_{\text{вигн.}}$), тривалість фази напруження ($T_{\text{напр.}}$), індекс напруження міокарду (ІНМ), об'ємну швидкість серцевого викиду (ОШВ).

Крім цього розраховували рівень кровонаповнення органів грудної клітки (КН) як

відношення квадрату відстані між грудними електродами реографа до квадрату електричного опору грудної клітки.

Рівень вагосимпатичної взаємодії оцінювали за варіабельністю серцевого ритму (BCP), зокрема, показникові нормалізованого відношення потужності спектру коливань t-RR у діапазоні 0,15–0,4 Гц до потужності спектру у діапазоні 0,04–0,4 Гц – $HF_{\text{норм}}$ (Коваленко, 2017). Показано, що цей показник генетично може бути генетично детермінованим (Shesterina et al., 2023). В досліджуваній групі $HF_{\text{норм}}$ був розподілений нормально. Тому за методом сигнальних відхилень ($\pm 0,5 \sigma$) в групі вимірюваних виділяли три підгрупи: симпатотоніки – з відносним переважанням тону симпатичного відділу автономної нервової системи (АНС) ($HF_{\text{норм}} < 42,9\%$, $n=26$), норма тоніки – з відносно пропорційними впливами на роботу серця симпатичного та парасимпатичного відділів автономної нервової системи ($HF_{\text{норм}}$ від 49,2% до 61,9%, $n=29$) та парасимпатотоніки – з відносним переважанням тону симпатичного відділу автономної нервової системи ($HF_{\text{норм}} > 61,9\%$, $n=21$).

Статистичний аналіз даних здійснювали за допомогою програми Statistica for Windows 12 (Statsoft Inc., Tulsa, USA). Застосовували метод однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA). Перевірку нормальності розподілу досліджуваних показників проводили за критерієм χ^2 . Для параметричної статистики розраховували середнє арифметичне (M), стандартну похибку вибіркового середнього (m). Вірогідність відмінностей оцінювали за F-критерієм Fisher (Glantz, 2012).

Результати та обговорення

У осіб з різним вихідним рівнем вегетативного тону спостерігали відмінності і в рівнях гемодинамічних показників в спокої лежачи (табл. 1).

Так тривалість інтервалу RR відрізнялась між кожною з груп і була найнижчою у симпатотоніків, а найвищою у парасимпатотоніків. Рівень діастолічного артеріального тиску був вищим у симпатотоніків у порівнянні з нормо- та парасимпатотоніками. Це цілком закономірно і показано як класичними дослідженнями, оскільки індекс вегетативної рівноваги Кердо розраховується з цих показників, так і сучасними порівняннями особливостей методик визначення вегетативного тону за допомогою аналізу характеристик BCP (Androshchuk & Zavorodnia, 2018).

Таблиця 1

Рівні показників центральної гемодинаміки у здорових молодих чоловіків з різним рівнем вегетативного тонусу

Показники	Групи за рівнем тонусу АНС		
	I, n=26	II, n=29	III, n=21
t-RR, мс	0,82±0,018	0,945±0,025*	1,068±0,04**
АТ _{діаст.} , мм рт.ст.	79,04±1,24	76,21±1,13*	75,25±1,28*
УІ, мл/м ²	33,55±3,76	34,07±3,72	46,64±4,81**
СІ, л/м ² ·хв	2,46±0,24	2,156±0,218	2,67±0,225#
T _{вигн.} , мс	0,25±0,005	0,259±0,008	0,275±0,009*
T _{напр.} , мс	0,127±0,004	0,117±0,003*	0,116±0,004*
ІНМ, %	33,62±0,89	31,52±0,92*	29,89±0,84*
ОШВ, мл/сек	238,40±21,76	220,92±20,80	290,19±29,47**
КН, у.о.	30,56±1,93	26,41±1,55*	31,66±2,22#

Примітка. * – $p < 0,05$ у порівнянні з I; # – $p < 0,05$ у порівнянні з II

Для показників серцевого викиду було характерне більш високе значення СІ і, особливо УІ у парасимпатотоніків у порівнянні з іншими типологічними групами. Це може пояснюватись значною часткою впливу гетерометричних механізмів на роботу серця у них (Цибенко, 2010).

При цьому T_{вигн.} було меншою, а T_{напр.} та ІНМ були вищими у симпатотоніків, що свідчить про більшу напруженість та меншу економічність в роботі серця у них.

ОШВ була значно більшою у парасимпатотоніків. Рівень кровонаповнення органів грудної клітки був найнижчим у нормотоніків у порівнянні з особами крайніх груп.

Аналіз динаміки тривалості інтервалу RR упродовж тесту градуйованої пасивної ортопроби показав наступне (рис. 1). При положенні 15° відмінності між групами зберігаються, за впливах 30° та 45° – між симпатотоніками та парасимпатотоніками нівелюються. При впливі перших 10 хвилин на рівні 60° відсутні між всіма групами, а при поверненні в горизонтальне положення відбувається відновлення цього показника до вихідних рівнів та відмінностей у всіх типологічних групах.

Діастолічний артеріальний тиск збільшувався у всіх досліджуваних групах пропорційно куту нахилу тулуба. Відмінності

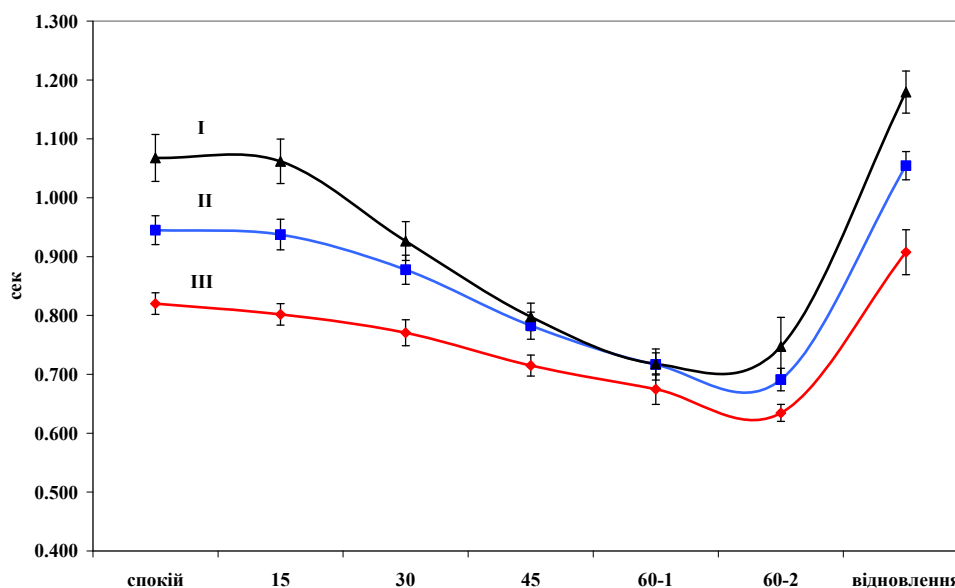


Рис. 1. Зміни тривалості інтервалу RR при градуальній пасивній ортопробі в осіб із різним рівнем вегетативного тонусу. I – симпатотоніки, II – нормотоніки, III – парасимпатотоніки

між групами, характерні у спокої лежачи, при цьому зберігаються. При поверненні в положення лежачи повного відновлення цього показника до вихідного рівня не спостерігається.

Суттєвими були зміни УІ у всіх групах при градуйованій ортопробі досягаючи мінімуму на 20-й хвилині в положенні тулуба 60°: для I з $33,55 \pm 3,76$ мл/м² до $16,18 \pm 1,40$ мл/м² ($p < 0,001$), для II – з $34,07 \pm 3,72$ мл/м² до $20,73 \pm 3,11$ мл/м² ($p < 0,001$) та для III – з $46,64 \pm 4,81$ мл/м² до $21,03 \pm 2,68$ мл/м² ($p < 0,001$). При цьому підвищення частоти серцевих скорочень не компенсувало зниження цього показника та СІ при максимальному навантаженні тесту знижувався у всіх групах. Відмінності між групами за вихідним рівнем вегетативного тону нівелювались.

Фазовий аналіз структури серцевого циклу у вимірюваних осіб виявив наступні закономірності. Період вигнання у всіх групах при максимальному нахилі знижувався, у найбільшому ступені у парасимпатотоніків. При переході в горизонтальне положення після проби відмічені вірогідні відмінності між його рівнями у всіх трьох групах: у I – $0,238 \pm 0,011$ сек, II – $0,269 \pm 0,008$ сек та III – $0,290 \pm 0,011$ сек. Фаза напруження та ІНМ збільшувався у всіх групах до рівня 45°. Для ІНМ при

максимальному гравітаційному навантаженні з'являлась відмінність між значеннями для II та III груп (рис. 2).

За цих умов різниці між групами за ОШВ нівелювались. Також нівелювались між групами різниці за рівнем кровонаповнення органів грудної порожнини.

Таким чином, вихідний рівень вегетативного тону може суттєво впливати на зміни показників центральної гемодинаміки при градуйованій пасивній ортопробі.

Важливим було проаналізувати не тільки рівні показників центральної гемодинаміки у осіб з різним рівнем вегетативного тону, але і їх реактивність при проведенні пасивної градуальної ортопроби. В таблиці 2 представлені зміни показників при куті нахилу 60°.

Так відбувалось більш значне зменшення t-RR у III групі в порівнянні з I та II та у II в порівнянні з I. Зниження УІ було більш виражене у парасимпатотоніків. Разом з цим СІ за цих умов не змінювався тільки у парасимпатотоніків, цілком ймовірно за рахунок менших зрушень кровонаповнення органів грудної клітки. Показники кардіодинаміки у найбільшому ступені змінювались у III групі.

Таким чином, реактивність показників гемодинаміки при куті нахилу 60° пасивної ортопроби залежать від вихідного

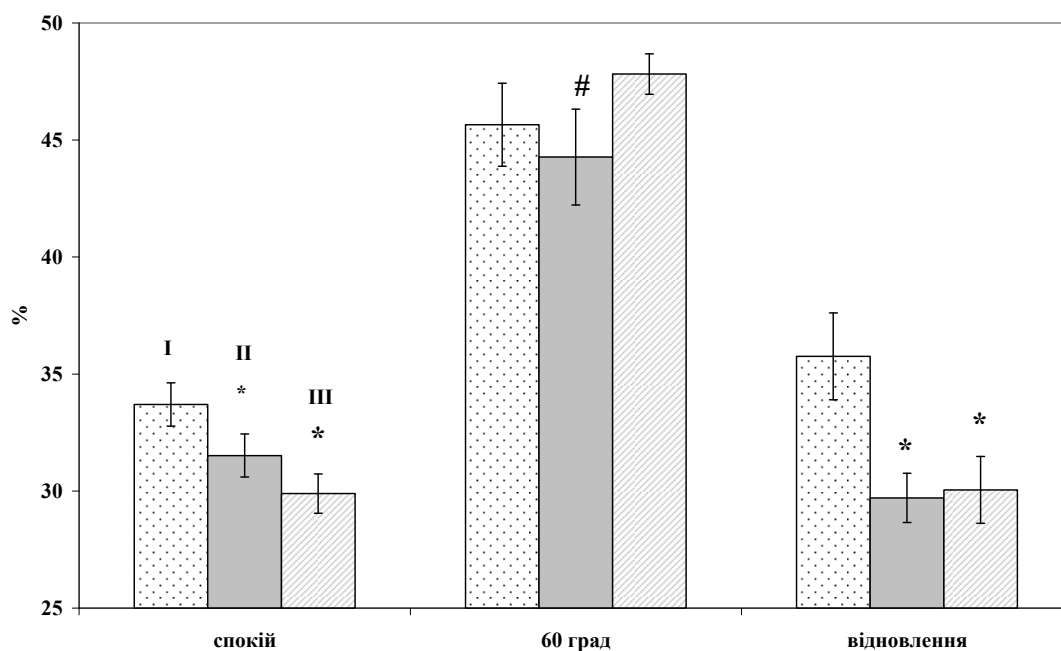


Рис. 2. Рівні індексу напруження міокарду у симпато- (I), нормо- (II) та парасимпатотоніків (III) за різних умов виконання градуальної пасивної ортопроби.

* – $p < 0,05$ у порівнянні з I; # – $p < 0,05$ у порівнянні з II

Таблиця 2

Реактивність гемодинамічних показників в положенні пасивної ортопроби 60° у осіб з різним рівнем вихідного вегетативного тонусу

Показники	Групи за рівнем тонусу АНС		
	I, n=26	II, n=29	III, n=21
t-RR, мс	-0,154±0,032	-0,254±0,021*	-0,320±0,043**
АТ _{діаст.} , мм рт. ст.	16,92±1,69	15,00±1,59	15,25±1,52
УІ, мл/м ²	-17,37±3,09	-13,34±4,08	-25,61±4,27**
СІ, л/м ² ·хв	-0,916±0,177	-0,393±0,279*	-1,027±0,234
T _{вигн.} , мс	-0,074±0,008	-0,059±0,021	-0,089±0,008#
T _{напр.} , мс	0,024±0,006	0,031±0,006	0,053±0,006**
ІНМ, %	11,93±1,49	12,75±2,04	17,93±0,90**
ОШВ, мл/сек	-63,80±19,14	-47,43±17,58	-95,74±20,63#
КН, у.о.	-3,54±1,58	-0,24±0,85	-3,23±1,23#

Примітка. * – p<0,05 у порівнянні з I; # – p<0,05 у порівнянні з II

рівня вегетативного тонусу і найбільші у парасимпатотоніків.

На початку тесту при куті нахилу 15° найбільш показовими були відмінності у реактивності тривалості фази напруження у групах осіб з різним вихідним рівнем вегетативного тонусу: I – 0,002±0,004 сек, II – 0,011±0,003 сек та III – 0,019±0,005 сек.

Аналіз реактивності показників гемодинаміки у період відновлення після проведення

тесту показав парадоксальний ефект зверх відновлення тривалості інтервалу RR у осіб II та III груп, що може обумовлюватись тривалим пригніченням парасимпатичних впливів під час ортопроби (табл. 3). Підтверджений висновок про підвищений рівень діастолічного тиску у всіх групах при цьому. Відмічена високий розкид реакцій відновлення показників УІ, СІ, ІНМ, ОШВ та КН. Причини цього вимагають подальших досліджень.

Таблиця 3

Реактивність гемодинамічних показників у період відновлення після тесту пасивної градуйованої ортопроби у осіб з різним рівнем вихідного вегетативного тонусу

Показники	Групи за рівнем тонусу АНС		
	I, n=26	II, n=29	III, n=21
t-RR, мс	0,084±0,043	0,11±0,016	0,112±0,025
АТ _{діаст.} , мм рт.ст.	4,62±1,11	3,62±0,74	3,00±1,22
УІ, мл/м ²	0,76±3,66	4,69±3,23	2,16±5,23
СІ, л/м ² ·хв	-0,387±0,204	0,014±0,184*	-0,294±0,209
T _{вигн.} , мс	-0,013±0,012	0,01±0,007*	0,015±0,01*
T _{напр.} , мс	-0,004±0,007	-0,004±0,004	0,007±0,006#
ІНМ, %	0,76±2,44	-1,81±1,05	0,16±1,34
ОШВ, мл/сек	17,19±34,56	20,32±15,47	-6,99±14,01
КН, у.о.	-2,47±1,82	0,71±1,00*	-1,45±1,40

Примітка. * – p<0,05 у порівнянні з I; # – p<0,05 у порівнянні з II

Висновки

1. У здорових молодих чоловіків з різним вихідним рівнем вегетативного тонусу спостерігали відмінності і в рівнях артеріального тиску, серцевого викиду, кардіодинаміки, кровонаповнення органів грудної клітки та, в особливості, тривалості інтервалу RR в спокої лежачи.

2. Показано, що вихідний рівень вегетативного тонусу може суттєво впливати на зміни показників центральної гемодинаміки при градуйованій пасивній ортопробі.

3. Реактивність показників гемодинаміки при куті нахилу 60° пасивної ортопроби залежать від вихідного рівня вегетативного тонусу і найбільші у парасимпатотоніків.

4. На початку тесту при куті нахилу 15° найбільш показовими були відмінності у реактивності тривалості фази напруження у групах осіб з різним вихідним рівнем вегетативного тонусу: I – 0,002±0,004 сек, II – 0,011±0,003 сек та III – 0,019±0,005 сек.

5. Аналіз реактивності показників гемодинаміки у період відновлення після прове-

дення тесту показав парадоксальний ефект обумовлюватись тривалим пригніченням
зверх відновлення тривалості інтервалу RR парасимпатичних впливів під час пасивної
у нормо- та парасимпатотоніків, що може ортопроби.

Список використаної літератури

Андрощук О.І., Кудій Л.І., Рибалко А.В., Черненко Н.П. Хвильова структура серцевого ритму при ортопробі у осіб з різним рівнем вегетативного тону. *Вісник Черкаського університету. Серія біологічні науки*. 2021. № 1. С. 4–11. <https://doi.org/10.31651/2076-5835-2018-1-2021-1-4-11>.

Коваленко С.О. Характеристика та теоретичні основи методів аналізу варіабельності серцевого ритму. *Український журнал медицини, біології та спорту*. 2017. № 2. С. 223–233. <https://doi.org/10.26693/jmbs02.02.223>.

Ковтун М.Ф. Мінливість, змінюваність, еволюція. *Вісник Черкаського університету. Серія біологічні науки*. 2018. № 1. С. 49–59. <https://doi.org/10.31651/2076-5835-2018-1-2-49-59>.

Цибенко В.О. Кровообіг. Фізіологія з основами патофізіології. Черкаси. Черкаський ЦНП. 2010. 295 с.

Androshchuk O.I., Zavhorodnia V.A. Correlation of vegetative tone indicator with Kerdo index and heart rate variability. *Вісник Черкаського університету. Серія біологічні науки*. 2018. № 1. С. 3–6. <https://doi.org/10.31651/2076-5835-2018-1-1-3-6>.

Aponte-Becerra L., Novak P. Tilt Test: A Review. *J Clin Neurophysiol*. 2021. № 38 (4). P. 279–286. <https://doi.org/10.1097/WNP.0000000000000625>.

Cheshire W.J., Goldstein D. Autonomic uprising: the tilt table test in autonomic medicine. *Clin Auton Res*. 2019. № 29 (2). P. 215–230. <https://doi.org/10.1007/s10286-019-00598-9>.

Glantz S.A. Primer of biostatistics. 7th edition, McGraw-Hill: Medical, New York, 2012, 320 p.

Gómez-Medina A., Lozano-Castillo A., Valencia S. Statistics, Cerebrovascular Reactivity, and Prior COVID-19. *AJR Am J Roentgenol*. 2023. 221 (3). 399. <https://doi.org/10.2214/AJR.23.29355>.

Islam M.T. Radiation interactions with biological systems. *Int J Radiat Biol*. 2017. 93 (5). 487–493. <https://doi.org/10.1080/09553002.2017.1286050>.

Jelavić M., Babić Z., Hećimović H., Erceg V., Pintarić H. The role of tilt-table test in differenteal diagnosis of unexplained syncope. *Acta Clin Croat*. 2015. № 54 (4). P. 417–423.

Kubichek W.G., Patterson R.P., Wetsol D.A. Impedanse cardiography as a noninvasive method of monitoring cardiac function and other parameters of the cardiovascular system. *Ann. N.Y. Acad. Sci*. 1970. № 2. P. 724–732.

Lattanzi S., Słomka A., Divani A.A. Blood Pressure Variability and Cerebrovascular Reactivity. *Am J Hypertens*. 2023. 36 (1). 19–20. <https://doi.org/10.1093/ajh/hpac114>.

Shesterina D.V., Palamarchuk A.L., Kovalenko S.O. The effect of low-intensity intermittent pneumatic compression in persons with different types of regulation of the autonomic nervous system on central hemodynamics. *Fiziol. Zh.* 2023. 69 (3). 92–98. <https://doi.org/10.15407/fz69.03.092>.

Sutton R., Fedorowski A., Olshansky B., Gert van Dijk J., Abe H., Brignole M., de Lange F., Kenny R., Lim P., Moya A., Rosen S., Russo V., Stewart J., Thijs R., Benditt D. Tilt testing remains a valuable asset. *Eur Heart J*. 2021. № 42 (17). P. 1654–1660. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehab084>.

White L., Jones H., Davies A. What is a tilt table test and why is it performed during the investigation of syncope? *Br J Hosp Med (Lond)*. 2021. № 82 (10). P. 1–7. <https://doi.org/10.12968/hmed.2020.0462>.

References (translated & transliterated)

Androshchuk, O.I., Kudii, L.I., Rybalko, A.V., & Chernenko, N.P. (2021). Khvylova struktura sertshevoho rytmu pry ortoprobi u osib z riznym rivnem vehetatyvnoho tonusu [Wave structure of heart rhythm during orthoprosthesis in individuals with different levels of autonomic tone]. *Visnyk Cherkaskoho universytetu. Seriiia biolohichni nauky [Bulletin of Cherkasy University. Series of biological sciences]*, 1, 4–11. <https://doi.org/10.31651/2076-5835-2018-1-2021-1-4-11> [in Ukrainian].

Kovalenko, S.O. (2017). Kharakterystyka ta teoretychni osnovy metodiv analizu variabelnosti sertshevoho rytmu [Characteristics and theoretical foundations of methods for analysing heart rate

variability]. *Ukrainskyi zhurnal medytsyny, biolohii ta sportu [Ukrainian Journal of Medicine, Biology and Sports]*, 2, 223–233. <https://doi.org/10.26693/jmbs02.02.223> [in Ukrainian].

Kovtun, M.F. (2018). Minlyvist, zminiuvanist, evoliutsiia [Variability, changeability, evolution]. *Visnyk Cherkaskoho universytetu. Serii biologichni nauky [Bulletin of Cherkasy University. Series of biological sciences]*, 1, 49–59. <https://doi.org/10.31651/2076-5835-2018-1-2-49-59> [in Ukrainian].

Tsybenko, V.O. (2010). Krovoobih. Fiziolohiia z osnovamy patofiziolohii [Blood circulation. Physiology with the basics of pathophysiology]. *Cherkasy. Cherkaskyi TsNII [Cherkasy. Cherkasy Scientific Information Centre]*. 295 p. [in Ukrainian].

Androshchuk, O.I., & Zavorodnia, V.A. (2018). Correlation of vegetative tone indicator with Kerdo index and heart rate variability. *Visnyk Cherkaskoho universytetu. Serii biologichni nauky [Bulletin of Cherkasy University. Series of biological sciences]*, 1, 3–6. <https://doi.org/10.31651/2076-5835-2018-1-1-3-6> [in English].

Aponte-Becerra, L., & Novak, P. (2021). Tilt Test: A Review. *J Clin Neurophysiol.* 38 (4), 279–286. <https://doi.org/10.1097/WNP.0000000000000625> [in English]

Cheshire, W.J., & Goldstein, D. (2019). Autonomic uprising: the tilt table test in autonomic medicine. *Clin Auton Res.*, 29 (2), 215–230. <https://doi.org/10.1007/s10286-019-00598-9> [in English].

Glantz, S.A. (2012). *Primer of biostatistics*. 7th edition, McGraw-Hill: Medical, New York, 320 p. [in English].

Gómez-Medina, A., Lozano-Castillo, A., & Valencia, S. (2023). Statistics, Cerebrovascular Reactivity, and Prior COVID-19. *AJR Am J Roentgenol.* 221 (3), 399. <https://doi.org/10.2214/AJR.23.29355> [in English].

Islam, M.T. (2017). Radiation interactions with biological systems. *Int J Radiat Biol.*, 93 (5), 487–493. <https://doi.org/10.1080/09553002.2017.1286050> [in English].

Jelavić, M., Babić, Z., Hećimović, H., Erceg, V., & Pintarić, H. (2015). The role of tilt-table test in differential diagnosis of unexplained syncope. *Acta Clin Croat*, 54 (4), 417–423 [in English].

Kubichek, W.G., Patterson, R.P., & Wetsol, D.A. (1970). Impedance cardiography as a noninvasive method of monitoring cardiac function and other parameters of the cardiovascular system. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 2, 724–732 [in English].

Lattanzi, S., Słomka, A., & Divani, A.A. (2023). Blood Pressure Variability and Cerebrovascular Reactivity. *Am J Hypertens*, 36 (1), 19–20. <https://doi.org/10.1093/ajh/hpac114> [in English].

Shesterina, D.V., Palamarchuk, A.L., & Kovalenko, S.O. (2023). The effect of low-intensity intermittent pneumatic compression in persons with different types of regulation of the autonomic nervous system on central hemodynamics. *Fiziol. Zh.*, 69 (3), 92–98. <https://doi.org/10.15407/fz69.03.092> [in English].

Sutton, R., Fedorowski, A., Olshansky, B., Gert van Dijk, J., Abe, H., Brignole, M., de Lange, F., Kenny, R., Lim, P., Moya, A., Rosen, S., Russo, V., Stewart, J., Thijs, R., & Benditt, D. (2021). Tilt testing remains a valuable asset. *Eur Heart J.*, 42 (17), 1654–1660. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehab084> [in English].

White, L., Jones, H., & Davies, A. (2021). What is a tilt table test and why is it performed during the investigation of syncope? *Br J Hosp Med (Lond)*, 82 (10), 1–7. <https://doi.org/10.12968/hmed.2020.0462> [in English].

Отримано: 26.04.2024
Прийнято: 03.05.2024



УДК 582.263:504(285.3)(477.42)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.9>

ФІТОПЛАНКТОН СТАВКІВ РЕКРЕАЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ЖИТОМИРСЬКОГО РАЙОНУ

Ю. С. Шелюк¹, О. П. Житова², М. М. Микула³, І. І. Оводюк⁴

Представлено структурно-функціональну характеристику фітопланктону ставків рекреаційного призначення Станишівського і Пряжівського (Житомирський район, Житомирська обл.), з'ясовано їх біопродукційний потенціал та зроблено оцінку якості вод.

Показано, що фітопланктон ставків має багатий видовий склад. У сезонному розподілі водоростей максимальна кількість видових і внутрішньовидових таксонів спостерігається в осінній період. У всі сезони провідна роль у формуванні видового та внутрішньовидового багатства вододім належить відділам Chlorophyta, Bacillariophyta та Euglenozoa, а в Станишівському ставку – ще й Cyanoprocarota у літній період.

За біомасою фітопланктону якість води вододім відповідає III класу якості вод категорії «слабко забруднені».

У фітопланктоні ставків провідна роль належала планктонно-бентосним формам; видам-космополітам за географічною приуроченістю; алкаліфілілам та індиферентам за відношенням до рН; олігогалобам-індиферентам за галобністю; стоячо-текучим формам. За рівнем органічного забруднення за системою Пантле-Бук у модифікації Сладечека якість води відповідає II класу якості вод. Оцінка органічного забруднення вод за Ватанабе засвідчила переважання у ставках еврисапробів.

¹ доктор біологічних наук, професор,
професор кафедри ботаніки, біоресурсів та збереження біорізноманіття
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: Shelyuk_Yulya@ukr.net
ORCID: 0000-0001-6429-1028

² доктор біологічних наук, професор,
професор кафедри лісівництва, лісових культур та таксації лісу
(Поліський національний університет, м. Житомир)
e-mail: elmi1969@meta.ua
ORCID: 0000-0003-2572-4163

³ кандидат медичних наук, доцент, доцент кафедри фізіології
(Національний медичний університет імені О. О. Богомольця, м. Київ)
e-mail: mykula.nmu@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9752-8711

⁴ здобувач освіти другого (магістерського) рівня спеціальності 091 Біологія та біохімія
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: ovodiuk05@gmail.com
ORCID: 0009-0001-1015-608X

Середні значення індексу Шеннона, розраховані для фітопланктону Пряжівського і Станишівського ставків, вказують на переважання олігодомінантної структури водоростевих угруповань.

Висока інтенсивність фотосинтезу ставків є типовою для водойм та водотоків зони Українського Полісся. Співвідношення інтегральних показників первинної продукції фітопланктону й деструкції органічної речовини вказує на переважання автотрофної фази у ставках. Порівняння структурно-функціональних характеристик фітопланктону ставків рекреаційного призначення із природними (річками й озерами) та антропогенно зміненими водними об'єктами (водосховищами), засвідчило загальні спільні механізми формування й функціонування їх автотрофної ланки. Відмінною особливістю є нижчі у порівнянні з іншими типами водойм значення інформаційного різноманіття фітопланктону, на що вказують величини H_B . Вважаємо, що це зумовлено специфікою штучно створених водойм.

Ключові слова: фітопланктон, ставки, якість води, біомаса, індекс Шеннона, первинна продукція, деструкція.

PHYTOPLANKTON OF RECREATIONAL PONDS OF ZHYTOMYR DISTRICT

Yu. S. Sheliuk, O. P. Zhitova, M. M. Mykula, I. I. Ovodiuk

The structural and functional characteristics of the phytoplankton of recreational ponds of Stanyshivskiyi and Pryazhivskiyi (Zhytomyr district, Zhytomyr region) are presented, their bioproduction potential is clarified, and water quality is assessed.

It is shown that the phytoplankton of ponds has a rich species composition. In the seasonal distribution of algae, the maximum number of specific and intraspecific taxa is observed in the autumn period.

In all seasons, the Chlorophyta, Bacillariophyta and Euglenozoa divisions play a leading role in the formation of the species and intraspecies richness of water bodies, and in the Stanyshiv pond – also Cyanoprocarota in the summer.

According to the biomass of phytoplankton, the water quality of the reservoirs corresponds to the III class of water quality of the «slightly polluted» category.

In the phytoplankton of ponds, the leading role belonged to planktonic-benthic forms; to cosmopolitan species by geographical location; alkaliphiles and indifferents in relation to pH; to oligohalobes-indifferent in terms of halobity; stationary and flowing forms. According to the level of organic pollution according to the Pantle-Buk system in Sladечek's modification, the water quality corresponds to the II class of water quality. Watanabe's assessment of organic water pollution showed a predominance of Eurysprobes in the ponds.

The average values of the Shannon index, calculated for the phytoplankton of the Pryazhivskiyi and Stanyshivskiyi ponds, indicate the predominance of the oligodominant structure of algal communities.

The high intensity of photosynthesis in ponds is typical for reservoirs and watercourses of the Ukrainian Polissia zone. The ratio of the integral indicators of the primary production of phytoplankton and the destruction of organic matter indicates the predominance of the autotrophic phase in the ponds. A comparison of the structural and functional characteristics of phytoplankton in recreational ponds with natural (rivers and lakes) and anthropogenically altered water bodies (reservoirs) proved the common mechanisms of formation and functioning of their autotrophic link. A distinctive feature is the lower values of the informative diversity of phytoplankton compared to other types of water bodies, as indicated by the values of H_B . We believe that this is due to the specifics of artificially created reservoirs.

Key words: phytoplankton, ponds, water quality, biomass, Shannon index, primary production, destruction.

Вступ

Загалом в Україні створено близько 27 500 ставків. Із них майже 15 тисяч мають багатоцільове призначення і використовуються для ведення аквакультури, підтримки відповідних рівнів води (меліо-

ративні ставки), водозабезпечення, розведення навколоводних птахів та звірів, рекреації тощо. На Поліссі ставки рекреаційного призначення є невід'ємним компонентом ландшафтів, водночас використовуються для спортивного рибальства. Антропогенна

трансформація гідробіоти поверхневих вод України зобов'язує науковців шукати нетривіальні шляхи підтримки та збереження біорізноманіття, зокрема у функціонально близьких до природних екосистем – водоймах помірної експлуатації. Значною мірою створення ставків на водотоках компенсувало деградацію поверхневих природних вод і створило додаткові місця існування для багатьох груп гідробіонтів (Dubrovsky, 2018).

Саме тому дослідження екологічної ролі таких ставків є актуальним, як із позиції структури автотрофної ланки, так і вивчення їх біопродукційного потенціалу.

Мета дослідження – представити структурно-функціональну характеристику фітопланктону ставків рекреаційного призначення, з'ясувати їх біопродукційний потенціал та зробити оцінку якості вод.

Матеріал і методи

Для з'ясування особливостей формування та функціонування ставків рекреаційного призначення у якості модельних об'єктів досліджено Пряжівський (50°11'07" N 28°40'34" E) та Станишівський (50 13' 13" N, 28 42' 58" E) ставки (Житомирський район, Житомирська область). Дослідження проводилися упродовж 2020–2023 рр. Відбір альгологічних проб здійснювали двічі на місяць упродовж вегетаційного сезону стандартними методами (Методи, 2006).

Водночас визначали деякі гідрофізичні й гідрохімічні показники (температуру, кольоровість, прозорість води, вміст розчиненого у воді кисню, рН, вміст заліза, нітрогену нітратів, нітритів і амонійного, а також фосфору фосфатів, перманганатну окиснюваність) (табл. 1). Загалом за період досліджень було відібрано і оброблено 64 альгологічні проби. Таксономічна номенклатура водоростей представлена з урахуванням (Algae ..., 2006; 2009; 2011) відповідно до міжнародного електронного каталогу AlgaeBase (Guiry & Guiry, 2023). Сапробіологічна оцінка якості вод представлена за методом Пантле-Букк (Pantle & Buck, 1955) у модифікації Сладечека (Sladecsek, 1986). Складність структури водоростевих угруповань оцінювали за індексом Шеннона (Ignatiades, 2020) за біомасою фітопланктону, оскільки власне біомаса є показником реалізованої перинної продукції (Scherbak, 1999; Shelyuk, 2022). Первинну продукцію фітопланктону ставків і деструкцію органічної речовини визначали кисневою модифікацією склянкового методу на горизонтах 0,10, 0,25, і 0,5 м у добовій експозиції (Shelyuk, 2021).

Аналіз еколого-токсикологічної ситуації у досліджуваних ставках у різні сезони 2020–2023 рр. (за вмістом у воді нафтопродуктів, аніонних і катіонних синтетичних поверхнево-активних речовин та іонів цинку II (0,004–0,025 мг/дм³) кад-

Таблиця 1

Гідрофізичні й гідрохімічні показники води ставків рекреаційного призначення Житомирського району (за результатами досліджень 2020–2023 рр.)

№	Показники	Фактична концентрація	
		Пряжівський ставок	Станишівський ставок
1	Запах	2 бали	2 бали
2	Кольоровість	25°	29°
3	Прозорість	0,70 м	0,65 м
4	Каламутність	3,21 мг/дм ³	3,34 мг/дм ³
5	Водневий показник (рН)	7,48	7,88
6	Дихроматна окисність	6,98 мг O ₂ /дм ³	7,48 мг O ₂ /дм ³
7	Вміст розчиненого у воді кисню	7,65 мг O ₂ /дм ³	8,04 мг O ₂ /дм ³
8	Окиснюваність перманганатна	9,23 мг/дм ³	8,17 мг/дм ³
9	Загальна лужність	4,56 ммоль/ дм ³	5,14 ммоль/ дм ³
10	Загальна жорсткість	4,23 ммоль/ дм ³	4,23 ммоль/ дм ³
11	Фосфор фосфатів	0,02 мг/дм ³	0,01 мг/дм ³
12	Залізо загальне	0,1 мг/дм ³	0,3 мг/дм ³
13	Хлориди	56,98 мг/дм ³	54,12 мг/дм ³
14	Нітроген амонійний	0,10 мг/дм ³	0,12 мг/дм ³
15	Нітроген нітратний	0,78 мг/дм ³	0,79 мг/дм ³
16	Нітроген нітритний	0,001 мг/дм ³	0,001 мг/дм ³

мію II (0,00005–0,0001 мг/дм³), плюм-буму II (0,0006–0,0010 мг/дм³) купруму II (0,0001–0,0008 мг/дм³), мангану II (0,015–0,100 мг/дм³), які належать до важких металів, показав, що їхні концентрації не перевищують досить жорсткий із точки зору оцінки екологічного стану водойм ГДК_{рибгосп.}

Результати

За час досліджень у планктоні Пряжівського ставка було виявлено 150 видів водоростей, представлених 155 внутрішньовидовими таксонами, включно з тими, що містять номенклатурний тип виду, із 8 відділів: Суанопрокарюта – 8 видів, представлених 8 внутрішньовидовими таксонами – 5,3% від загального числа видів, Euglenozoa – 41 (46 в.в.т.) – 27,3%, Ochrophyta – 11 (11) – 7,3%, Bacillariophyta – 45 (46) – 30,0%, Miozoa – 4 (4) – 2,7%, Cryptophyta – 2 (2) – 1,3%, Chlorophyta – 37 (37) – 24,7%, Charophyta – 2 (2) – 1,3%. У фітопланктоні Станишівського ставка було виявлено 145 видів водоростей, представлених 156 внутрішньовидовими таксонами, включно з тими, що містять номенклатурний тип виду, із 7 відділів: Суанопрокарюта – 28 видів (31 внутрішньовидовим таксоном – 19,3% – від загального числа видів, Euglenozoa – 12 (16) – 8,3%, Ochrophyta – 2 (2) – 1,3%, Bacillariophyta – 42 (44) – 29,0%, Miozoa – 4 (4) – 2,8, Chlorophyta – 51 (53) – 35,1%, Charophyta – 6 (6) – 4,1%.

Порівняння водосховищ за складом видів показало їх значну подібність (коефіцієнт водової подібності Серенсена склав 0,36).

Родовий коефіцієнт, розрахований для фітопланктону Пряжівського ставка, становив 2,1, Станишівського – 2,2. Провідними родами впродовж усіх сезонів у Пряжівському ставку були *Euglena* Ehrenb. – 11%, *Phacus* Dujard. – 8%, *Trachelomonas* Ehrenb. – 6%, *Nitzschia* Hassal – 5%, *Chlamydomonas* Ehrenb., *Navicula* Vory та *Kephyrion* Pascher – по 3%, які мали пріоритет у видовому багатстві водотоку і склали майже 42% усього видового і внутрішньовидового багатства фітопланктону водойми. У Станишівському ставку за видовим багатством пріоритет мали: *Nitzschia* – 9%, *Cyclotella* – 7%, *Trachelomonas* – 6%, *Navicula* і *Desmodesmus* (R.Chodat) S.S.An, T.Friedl & E.Hegewald – по 5%, *Chlamydomonas* і *Kephyrion* – по 4%.

У сезонному розподілі водоростей ставків спостерігали максимальну кількість видів і внутрішньовидових таксонів в осінній період. У всі сезони провідна роль у формуванні видового та внутрішньовидо-

вого багатства водойм належала відділам Chlorophyta, Bacillariophyta та Euglenophyta.

Найбільшу частоту трапляння у ставках мали: *Cyclotella meneghiniana* Kütz. (81–85%), *Chlamydomonas globosa* J. Snow (80–86%), *Trachelomonas volvocina* Ehrenb. (58–66%), *Gomphosphaeria apponina* Kütz. (57–60%), *Hippodonta lueneburgensis* (Grunow) Lange-Bert., D.Metzeltin et A.Witkowski in Lange-Bert (55–57%), *Tabularia fasciculata* (C.Agardh) D.M.Williams et Round (52–56%), *Trachelomonas hispida* (Perty) (51–55%), *Coelasphaerium kuetzingianum* Nägeli (36–65%), *Monoraphidium arcuatum* (Korschikov) Hindak (по 52%), *Peridinium cinctum* (O. F.Müll) Ehrenb. (42–50%).

Кількісні показники розвитку фітопланктону Пряжівського і Станишівського ставків упродовж 2020–2023 рр. коливалися у досить широких межах. Середні значення чисельності та біомаси сягали відповідно: 3,8851 ± 0,06 і 4,51 ± 0,07 млн. кл/дм³ та 2,1 ± 0,05 і 2,2 ± 0,05 г/м³. Навесні середня чисельність сягала 3,22 ± 0,04 і 2,39 ± 0,05 млн. кл/дм³, біомаса – 0,46 ± 0,01 і 1,34 ± 0,01 г/м³; відповідно влітку – 3,66 ± 0,15 і 3,80 ± 0,11 млн. кл/дм³ та 2,46 ± 0,02 і 3,17 ± 0,05 г/м³; восени – 4,61 ± 0,13 і 4,71 ± 0,19 млн. кл/дм³ та 4,05 ± 0,07 і 3,28 ± 0,04 г/м³. За біомасою фітопланктону якість води водойм відповідає III класу якості вод категорії «слабко забруднені».

Загалом структуроутворюючими відділами у формуванні біомаси фітопланктону у ставках навесні були Bacillariophyta, Chlorophyta та Ochrophytata, упродовж літнього сезону – Суанопрокарюта, Chlorophyta Miozoa, восени – Chlorophyta, Euglenophyta Суанопрокарюта, а взимку – Bacillariophyta, Chlorophyta й Miozoa.

За чисельністю клітин водоростей упродовж усіх сезонів до складу домінуючого комплексу досліджуваних ставків належали: *Gomphosphaeria apponina*, *Chlamydomonas globosa*, *Coelasphaerium kuetzingianum*, за біомасою фітопланктону – *Gomphosphaeria apponina*, *Peridinium cinctum*, *Cyclotella meneghiniana*. Загалом за досліджуваний період у фітопланктоні Пряжівського ставка було виявлено 38 домінантів за чисельністю та 46 за біомасою водоростевих клітин, а в Станишівському ставку – відповідно 42 і 48. Таким чином, близько третини складу водоростей водойм у різні періоди часу визначали структуру їх угруповань.

У фітопланктоні ставків провідна роль належала планктонно-бентосним формам –

49,1% і 47,2% від загального числа видів-індикаторів місцеперебування. Частка планктонних форм сягала відповідно 28,5% від числа таксонів видового та внутрішньовидового рангу, для яких знайдено літературні відомості.

Щодо географічної приуроченості, то у фітопланктоні Пряжівського і Станишівського ставків домінували види-космополіти (відповідно 61% і 66%), для яких знайдено літературні відомості. Також ідентифіковано голарктичні (26% і 22%), бореальні (по 8% і 9%), циркумбореальні (4% і 2%) та ірано-туранські види (по 1%).

За відношенням до рН водорості досліджуваних ставків ранжували на: алкаліфілів – 45 і 47%, індіферентів – 46 і 44%, алкалібіонтів – 5 і 4%, ацидофілів – 4 і 5%.

За галобністю більшість видів водоростей у штучних водоймах є полігалобами – 62% у Пряжівському і 63% у Станишівському ставках, олігогалобами-галофілами – 16% і 15%, мезогалобами – 13% і 11%, олігогалобами – по 5%, олігогалобами-галофобами 3% і 5%, евригалінними формами – по 1%.

Види-індикатори текучості вод та їх насичення киснем ранжували на стоячо-текучі (70% і 72%), стоячі (27% і 26%) і текучі (3% і 2%), що свідчить про переважання у ставках, як типових лентичних водоймах, відносно повільної течії та помірного насичення вод киснем.

За відношенням до температури більшість видів водоростей є евртермними – 65% у Пряжівському ставку і 63% у Станишівському, на частку індіферентів припадає 27% і 30%, теплолюбних видів – 6% і 5%, а холодолюбних – відповідно по 2%.

Для оцінки ступеня органічного забруднення водойм було застосовано систему Пантле-Бук у модифікації Сладечека із врахуванням таких зон самоочищення: полісапробна, α і β -мезосапробна, олігосапробна й ксеносапробна. Індикаторні види водоростей розділилися між 5-ма

класами якості вод. Найбільше число видів водоростей досліджуваних водойм належать до II класу якості вод (51% і 53%) – «чисті». Зміни індексу сапробності у ставках рекреаційного призначення були в діапазоні 0,75–2,18, а середні їх значення загалом відповідали II класу якості вод: у Пряжівському ставку 1,74±0,08, і в Станишівському 1,94±0,05. Періодично фіксували погіршення якості води в досліджуваних водоймах, найчастіше у серпні-вересні внаслідок вторинного забруднення автохтонною органічною речовиною (Shelyuk, 2020). Проведена оцінка органічного забруднення вод за Ватанабе показала, що у Пряжівському ставку еврисапробами є 66% індикаторних видів водоростей, сапрофілами – 19%, сапроксенами – 15%; у Станишівському ставку відповідно 65%, 21% і 14%.

Оцінка інформаційного різноманіття була зроблена за індексом Шеннона, розрахованим за біомасою фітопланктону. Його середні значення, розраховані для фітопланктону Пряжівського і Станишівського ставків, відповідно сягали 1,85±0,22 біт/мг та 1,87±0,13 біт/мг, що вказує на переважання олідомінантної структури водоростевих угруповань. Середні значення H склали навесні 2,04±0,21 біт/мг і 2,09±0,19 біт/мг; влітку – 1,77±0,23 біт/мг і 1,74±0,17 біт/мг; восени – 1,82±0,16 біт/мг і 1,88±0,18 біт/мг.

Середні значення первинної продукції фітопланктону і деструкції органічної речовини ставків рекреаційного призначення Житомирського району наведено в таблиці 2.

Досить висока інтенсивність фотосинтезу ставків є типовою для водойм та водотоків зони Українського Полісся. Найімовірніше, вона обумовлена підвищеною швидкістю продукційних процесів досліджуваних водойм із малими глибинами, високою асиміляційною активністю автотрофної ланки їх екосистем й інтенсивним використанням сонячної енергії (Shelyuk, 2021).

Таблиця 2

Показники первинної продукції та деструкції органічної речовини ставків рекреаційного призначення Житомирського району

Показники	Ставки	
	Пряжівський	Станишівський
A_{max} , мг O_2 / (дм ³ ·добу)	4,26±0,11	4,62±0,12
ΣA , г O_2 / (м ² ·добу)	3,96±0,20	3,88±0,33
R , мг O_2 / (дм ³ ·добу)	2,51±0,13	2,86±0,32
ΣR , г O_2 / (м ² ·добу)	2,07±0,12	2,05±0,10

Співвідношення інтегральних показників первинної продукції фітопланктону й деструкції органічної речовини вказує на переважання автотрофної фази у ставках ($\Sigma A/\Sigma R$ коливається в межах 1,76–2,04). За індексом самоочищення/самозабруднення водойми належать до III класу якості.

Обговорення

Загалом порівняння структурно-функціональних характеристик фітопланктону ставків рекреаційного призначення із природними (річками й озерами) та антропогенно зміненими водними об'єктами (водосховищами) Українського Полісся (Shcherbak, 1999; Щербак та ін., 2011; Shelyuk, 2018; Shelyuk & Astahova, 2021) засвідчило загальні спільні механізми формування й функціонування їх автотрофної ланки. Окрім того, аналіз літературних джерел засвідчив спільні механізми формування й функціонування фітопланктону досліджуваних водойм із різними типами поверхневих прісноводних екосистем світу (Reynolds, 1980; 1984; Salmaso & Padisák, 2007; Deacon et al., 2018; Chen et al., 2021). Відмінною особливістю ставків рекреаційного призначення є нижчі у порівнянні з іншими типами водойм значення інформаційного різноманіття фітопланктону, на що вказують величини H_b . Вважаємо, що це зумовлено специфікою штучно створених водойм.

Отже, створення ставків на водотоках значною мірою компенсує деградацію поверхневих природних вод (Dubrovsky, 2018) і створює додаткові місця існування для багатьох груп гідробіонтів, зокрема водоростей.

Висновки

Фітопланктон ставків рекреаційного походження Житомирського району має багатий видовий склад: у Пряжівському ставку впродовж 2020–2023 рр. ідентифіковано 150 видів водоростей, представлених 155 внутрішньовидовими таксонами, включно з тими, що містять номенклатурний тип виду, із домінуванням у видовому багатстві діатомових (30,0%), евгленових (27,3%) і зелених (24,7%) водоростей; у Станишівському – 145 видів (156 в. в. т.) за провідної ролі зелених (35,1%), діатомових (29,0%) і синьозелених (19,3%).

У сезонному розподілі водоростей ставків спостерігали максимальну кількість видових і внутрішньовидових таксонів в осінній період. У всі сезони провідна роль у формуванні видового та внутріш-

ньовидового багатства водойм належала відділам Chlorophyta, Bacillariophyta та Euglenozoa, а в Станишівському ставку – ще й Cyanoprokaryota у літній період.

Середні значення чисельності та біомаси фітопланктону Пряжівського і Станишівського ставків упродовж 2020–2023 рр. сягали відповідно: $3,8851 \pm 0,06$ і $4,51 \pm 0,07$ млн. кл/дм³ та $2,1 \pm 0,05$ і $2,2 \pm 0,05$ г/м³. Структуроутворюючими відділами у формуванні біомаси фітопланктону у ставках навесні були Bacillariophyta, Chlorophyta та Ochrophytata, упродовж літнього сезону – Cyanoprokaryota, Chlorophyta, Miozoa, восени – Chlorophyta, Euglenophyta Cyanoprokaryota, а взимку – Bacillariophyta, Chlorophyta й Miozoa.

За біомасою фітопланктону якість води водойм відповідає III класу якості категорії «слабко забруднені».

У фітопланктоні ставків провідна роль належала планктонно-бентосним формам (49,1% у Пряжівському ставку і 47,2% у Станишівському від загального числа видів-індикаторів місцеперебування); видам-космополітам (відповідно 61% і 66%) за географічною приуроченістю; алкаліфілітам (45 і 47%) та індиферентам (46 і 44%) за відношенням до рН; поліглобам за галобністю (62% і 63%); еври-термним видам водоростей; стоячо-текучим формам (70% і 72%), що свідчить про переважання у ставках, як типових лентичних водоймах, відносно повільної течії та помірного насичення їх киснем. За рівнем органічного забруднення за системою Пантле-Бук у модифікації Сладечека якість води водойм відповідає II класу якості вод («чисті»). Оцінка органічного забруднення вод за Ватанабе засвідчила переважання у ставках еврисапробів (66% у Пряжівському ставку і 65% у Станишівському).

Середні значення індексу Шеннона, розраховані для фітопланктону Пряжівського і Станишівського ставків, сягали $1,85 \pm 0,22$ біт/мг та $1,87 \pm 0,13$ біт/мг, що вказує на переважання олідомінантної структури водоростевих угруповань.

Висока інтенсивність фотосинтезу ставків ($4,26 \pm 0,11$ і $4,62 \pm 0,12$ мг O₂/ (дм³·добу) є типовою для водойм та водотоків зони Українського Полісся. Найімовірніше, вона обумовлена підвищеною швидкістю продукційних процесів досліджуваних водойм із малими глибинами, високою асиміляційною активністю автотрофної ланки їх

екосистем й інтенсивним використанням сонячної енергії.

Співвідношення інтегральних показників первинної продукції фітопланктону й деструкції органічної речовини вказує на переважання автотрофної фази у ставках (коефіцієнт $\sum A/\sum R$ був у межах 1,76–2,04).

Порівняння структурно-функціональних характеристик фітопланктону ставків рекреаційного призначення із природними

(річками й озерами) та антропогенно зміненими водними об'єктами (водосховищами), засвідчило загальні спільні механізми формування й функціонування їх автотрофної ланки. Відмінною особливістю є нижчі у порівнянні з іншими типами водойм значення інформаційного різноманіття фітопланктону, на що вказують величини H_B , що, найімовірніше, зумовлено специфікою штучно створених водойм.

Список використаної літератури

Романенко В.Д. Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод. Київ : ЛОГОС, 2006. С. 8–24.

Щербак В.І., Майстрова Н.В., Морозова А.О., Семенюк Н.Є. Національний природний парк «Прип'ять–Стохід». Різноманіття альгофлори і гідрохімічна характеристика акваландшафтів. Київ : Фітосоціоцентр, 2011. 164 с.

Chen X.J., Li X., Li J.J. Indicator Species of Phytoplankton Pollution and Water Quality Evaluation in Wuliangsu. *Ecol. Sci.* 2021. № 40 (3). P. 231–237. <https://doi.org/10.14108/j.cnki.1008-8873.2021.03.027>.

Deacon C., Samways M.J., Pryke J.S. Artificial reservoirs complement natural ponds to improve pondscape resilience in conservation corridors in a biodiversity hotspot. *Plos One*. 2018. № 20. P. 13–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204148>.

Dubrovsky Yu.V. Features of Quasi-Natural Ecosystems and Their Role in the Conservation of Biodiversity. *Ecology and Evolutionary Biology*. 2018. Vol. 3. № 4. P. 27–32.

Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway, 2020. [Electronic resource] URL: <http://www.algaebase.org> (access date 30.03.2024).

Ignatiades L. Taxonomic Diversity, Size-Functional Diversity, and Species Dominance Interrelations in Phytoplankton Communities: a Critical Analysis of Data Interpretation. *Mar. Biodivers.* 2020. № 50 (4). P. 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12526-020-01086-4>.

Pantle R., Buck H. Die biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse. *Gas- und Wasserbach*. 1955. Vol. 96. № 18. 604 p.

Reynolds C.S. Phytoplankton Assemblages and Their Periodicity in Stratifying lake Systems. *Ecography*. 1980. № 3. P. 141. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.1980.tb00721>.

Reynolds C.S. Phytoplankton Periodicity: the Interactions of Form, Function and Environmental Variability. *Freshw. Biol.* 1984. № 14 (2). P. 111–142. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1984.tb00027.x>.

Salmaso N., Padisák J. Morpho-Functional Groups and Phytoplankton Development in Two Deep Lakes (Lake Garda, Italy and Lake Stechlin, Germany). *Hydrobiologia*. 2007. № 578 (1). P. 97–112. <https://doi.org/10.1007/s10750-006-0437-0>.

Shcherbak V.I. Primary production of algae in the Dnieper and Dnieper Reservoirs. *Hydrobiol. J.* 1999. Vol. 35. № 1. P. 1–13. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v35.i1.10>.

Shelyuk Y.S., Astahova L.Y. Phytoplankton succession in the anthropogenic and climate ecological transformation of freshwater ecosystems. *Biosystems Diversity*. 2021. № 29 (2). P. 119–128. <https://doi.org/10.15421/012116>.

Shelyuk Yu.S. Peculiarities of the Processes of Production and Decomposition in Artificial Aquatic Ecosystems. *Hydrobiological Journal*. 2022. № 58 (2). P. 19–33. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v58.i5.30>.

Shelyuk Yu.S. Solar energy utilization efficiency in the processes of phytoplankton photosynthesis in various aquatic ecosystems of the Polissya. *Hydrobiological Journal*. 2021. № 57 (4). P. 3–12. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v57.i4.10>.

Shelyuk Yu.S., Scherbak V.I. Phytoplankton structural and functional indices in the rivers of the Pripyat' and Teterev basins. *Hydrobiological Journal*. 2018. № 54 (3). P. 10–23.

Sladeček V. Diatoms as indicators of organic pollution. *Acta Hydrochim. Hydrobiol.* 1986. Vol. № 14 (5). P. 555–566. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v54.i3.10>.

Tsarenko P.M., Wasser S.P., Nevo E. Algae of Ukraine: diversity, nomenclature, taxonomy, ecology and geography. *Cyanoprocarayota, Euglenophyta, Chrysophyta, Xanthophyta, Raphidophyta, Phaeophyta, Dinophyta, Cryptophyta, Glaucocystophyta, and Rhodophyta*. Eds. Ruggell : Ganter Verlag, 2006. Vol. 1. 713 p.

Tsarenko P.M., Wasser S.P., Nevo E. Algae of Ukraine: diversity, nomenclature, taxonomy, ecology and geography. *Bacillariophyta*. Eds. Ruggell : Ganter Verlag, 2009. Vol. 2. 413 p.

Tsarenko P.M., Wasser S.P., Nevo E. Algae of Ukraine: diversity, nomenclature, taxonomy, ecology and geography. *Chlorophyta*. Eds. Ruggell : Ganter Verlag, 2011. Vol. 3. 511 p.

References (translated and transliterated)

Romanenko, V.D. (2006). Metody hidroekologichnykh doslidzhen' poverkhnevykh vod [Methods of hydroecological research of surface waters]. Kyiv : LOHOS [in Ukrainian].

Shcherbak, V.I., Maystrova, N.V., Morozova, A.O., & Semenyuk N.Ye. (2011). Natsional'nyy pryrodnyy park «Pryp'yat'-Stokhid». Riznomanitya al'hoflory i hidrokhimichna kharakterystyka akvalandshaftiv [Pripyat'-Stokhid National Nature Park. Diversity of algae flora and hydrochemical characteristics of aquascapes]. Kyiv : Fitosotsiotsentr [in Ukrainian].

Chen, X.J., Li, X., & Li, J.J. (2021). Indicator Species of Phytoplankton Pollution and Water Quality Evaluation in Wuliangshuai. *Ecol. Sci*, 40 (3), 231–237. <https://doi.org/10.14108/j.cnki.1008-8873.2021.03.027> [in English].

Deacon, C., Samways, M.J., & Pryke, J.S. (2018). Artificial reservoirs complement natural ponds to improve pondscape resilience in conservation corridors in a biodiversity hotspot. *Plos One*, 20, 13–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204148> [in English].

Dubrovsky, Yu.V. (2018). Features of Quasi-Natural Ecosystems and Their Role in the Conservation of Biodiversity. *Ecology and Evolutionary Biology*, 3 (4), 27–32 [in English].

Guiry, M.D., & Guiry, G.M. (2024) AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. [Electronic resource] URL: <http://www.algaebase.org>. (access date 30.03.2024) [in English].

Ignatiades, L. (2020). Taxonomic Diversity, Size-Functional Diversity, and Species Dominance Interrelations in Phytoplankton Communities: a Critical Analysis of Data Interpretation. *Mar. Biodivers*, 50 (4), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12526-020-01086-4> [in English].

Pantle, R., & Buck, H. (1955). Die biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse. *Gas- und Wasserbach*, 96 (18) [in English].

Reynolds, C.S. (1980). Phytoplankton Assemblages and Their Periodicity in Stratifying lake Systems. *Ecography*, 3, 141. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.1980.tb00721> [in English].

Reynolds, C.S. (1984). Phytoplankton Periodicity: the Interactions of Form, Function and Environmental Variability. *Freshw. Biol*, 14(2), 111–142. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1984.tb00027.x> [in English].

Salmaso, N., & Padisák, J. (2007). Morpho-Functional Groups and Phytoplankton Development in Two Deep Lakes (Lake Garda, Italy and Lake Stechlin, Germany). *Hydrobiologia*, 578 (1), 97–112. <https://doi.org/10.1007/s10750-006-0437-0> [in English].

Shcherbak, V.I. (1999). Primary production of algae in the Dnieper and Dnieper Reservoirs. *Hydrobiol. Journal*, 35 (1), 1–13 <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v35.i1.10/> [in English].

Shelyuk, Y.S., & Astahova, L.Y. (2021). Phytoplankton succession in the anthropogenic and climate ecological transformation of freshwater ecosystems. *Biosystems Diversity*, 29 (2), 119–128. <https://doi.org/10.15421/012116> [in English].

Shelyuk, Yu.S. (2021). Solar energy utilization efficiency in the processes of phytoplankton photosynthesis in various aquatic ecosystems of the Polissya. *Hydrobiological Journal*, 57 (4), 3–12. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v57.i4.10> [in English].

Shelyuk, Yu.S. (2022). Peculiarities of the Processes of Production and Decomposition in Artificial Aquatic Ecosystems. *Hydrobiological Journal*, 58 (2), 19–33. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v58.i5.30> [in English].

Shelyuk, Yu.S., & Scherbak, V.I. (2018). Phytoplankton structural and functional indices in the rivers of the Pripyat' and Teterev basins. *Hydrobiological Journal*, 54 (3), 10–23 [in English].

Sladěček, V. (1986). Diatoms as indicators of organic pollution. *Acta Hydrochim. Hydrobiol. J*, 14 (5), 555–566. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v54.i3.10> [in English].

Tsarenko, P.M., Wasser, S.P., & Nevo, E. (2009). Algae of Ukraine: diversity, nomenclature, taxonomy, ecology and geography. *Bacillariophyta*. Eds. Ruggell : Ganter Verlag, 2 [in English].

Tsarenko, P.M., Wasser, S.P., & Nevo, E. (2006). Algae of Ukraine: diversity, nomenclature, taxonomy, ecology and geography. *Cyanoprocarvota, Euglenophyta, Chrysophyta, Xanthophyta, Raphidophyta, Phaeophyta, Dinophyta, Cryptophyta, Glaucocystophyta, and Rhodophyta*. Eds. Ruggell : Ganter Verlag, 1 [in English].

Tsarenko, P.M., Wasser, S.P., & Nevo, E. (2011). Algae of Ukraine: diversity, nomenclature, taxonomy, ecology and geography. *Chlorophyta*. Eds. Ruggell : Ganter Verlag, 3 [in English].

Отримано: 22.04.2024

Прийнято: 02.05.2024



ГЕОГРАФІЯ

УДК 911.2+551.578.48; 528.952
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.10>

ДОСЛІДЖЕННЯ ГРАДІЄНТА ТЕМПЕРАТУР ВОДИ МІЖ Б'ЄФАМИ ПРИРОДНО-ТЕХНІЧНОЇ ГЕОСИСТЕМИ ДНІСТРОВСЬКОЇ ГАЕС

А. В. Зигар¹

Метою дослідження є з'ясування градієнту температури води між б'єфами Дністровської ГАЕС для майбутньої оцінки його впливу на зміну теплового балансу водойми. Для аналізу натурних методів вивчення впливу природно-технічної геосистеми (ПТГС) Дністровської ГАЕС на динамічні процеси у середовищі її функціонування використовувалася комплексна методика досліджень. Початковий етап включав аналіз результатів попередніх наукових досліджень, що стосувалися впливу інженерних гідротехнічних об'єктів на природне середовище. Це дозволило врахувати попередні висновки та визначити наявні знання в цій галузі. Далі, проводився тереновий (польовий) збір даних, який включав в себе натурні вимірювання та спостереження безпосередньо в зоні функціонування об'єкта дослідження. Водосховища разом з ГЕС та ГАЕС – це надзвичайно потужні природно-технічні, природно-інженерні комплекси. Дослідження таких комплексів перш за все відноситься до сфери конструктивної географії. З географічних позицій це особливі геосистеми, ландшафти, складові річково-басейнових геосистем загалом. Їх дослідження носять міждисциплінарний характер, поєднуючи природничі, соціально-економічні, географічні, геологічні, технічні та інші напрями. Зокрема, вони прямо стосуються планування, проектування та управління відповідними об'єктами. Важливим інструментом сучасних досліджень природно-технічних геосистем є ГІС-технології. Сучасні технології, такі як географічні інформаційні системи (ГІС), супутникові знімки, дистанційне зондування тощо, надають географам нові можливості для збору, аналізу та інтерпретації даних, що допомагає вирішувати складні проблеми більш ефективно. Прикладом застосування інтегрованого підходу у вивченні впливу природно-технічної геосистеми Дністровського каскаду ГЕС та ГАЕС на термодинамічні процеси. Дослідження дають змогу розширити розуміння конкретної проблеми управління антропогенним навантаженням в природно-технічній системі. Аналіз об'єкта, що проектується, як системи, що містить дві найважливіші частини – технічну і природну, робить системний підхід не окрасою, а обов'язковою умовою роботи, природознавця – союзником і поплічником проектувальника. Проектувати, створювати середовище, яке є оптимальним для життя людини, означає проектувати такі системи, конструкції, технології, щоб вони були максимально пов'язані з існуючими взаємозв'язками в природі.

Ключові слова: геоecологія, конструктивна географія, геосистеми, річково-басейнові системи, річково-долинний ландшафт, річкові природно-технічні системи, ландшафтно-технічні системи, ландшафтно-інженерні системи, ГІС-технології, Дністровська ГАЕС, натурні методи.

¹ аспірант географічного факультету
кафедри географії України та регіоналістики
(Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці)
email: zyhar.andrii@chnu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-3882-8829

A STUDY OF THE WATER TEMPERATURE GRADIENT BETWEEN THE BAYS OF THE NATURAL AND TECHNICAL GEOSYSTEM OF THE DNIESTER PSPP

A. V. Zyhar

The purpose of the study is to investigate the water temperature gradient between the flumes of the Dniester PSPP for the future assessment of its impact on changes in the heat balance of the reservoir. A comprehensive research methodology was used to analyse in-situ methods for studying the impact of the Dniester PSPP natural and technical geosystem on dynamic processes in the environment of its operation. The initial stage included an analysis of the results of previous scientific studies on the impact of hydraulic engineering facilities on the environment. This made it possible to take into account previous findings and identify existing knowledge in this area. Next, we carried out on-site (field) data collection, which included in-situ measurements and observations directly in the area of the study object. Reservoirs, together with HPPs and PSPPs, are extremely powerful natural and technical, natural and engineering complexes. The study of such complexes primarily falls within the scope of constructive geography. From the geographical point of view, these are special geosystems, landscapes, and components of river-basin geosystems in general. Their research is interdisciplinary in nature, combining natural, socio-economic, geographical, geological, technical and other areas. In particular, they are directly related to the planning, design and management of relevant facilities. GIS technologies are an important tool for modern research of natural and technical geosystems. Modern technologies, such as geographic information systems (GIS), satellite imagery, remote sensing, etc., provide geographers with new opportunities for collecting, analysing and interpreting data, which helps to solve complex problems more efficiently. An example of the application of an integrated approach is the study of the impact of the natural and technical geosystem of the Dniester cascade of HPPs and PSPs on thermodynamic processes. The research in this article allows us to expand our understanding of the specific problem of managing anthropogenic load in a natural and technical system. The analysis of the object being designed as a system containing two most important parts – technical and natural – makes the systems approach not a decoration, but a prerequisite for the work of a natural scientist: a geographer, an ecologist – an ally, an associate of the designer. Designing, creating an environment that is optimal for human life means designing such systems, structures, and technologies so that they are as closely related to the existing relationships in nature as possible.

Key words: *geoecology, constructive geography, geosystems, river-basin systems, river-valley landscape, river natural and technical systems, landscape technical systems, landscape engineering systems, GIS technologies, Dniester PSPP, field methods.*

Вступ

Водосховища разом з ГЕС та ГАЕС – це надзвичайно потужні природно-технічні, природно-інженерні комплекси. Дослідження таких комплексів перш за все відноситься до сфери конструктивної географії. З географічних позицій це особливі геосистеми, ландшафти, складові річково-басейнових геосистем загалом. Їх дослідження носять міждисциплінарний характер, поєднуючи природничі, соціально-економічні, географічні, геологічні, технічні та інші напрями. Зокрема, вони прямо стосуються планування, проектування та управління відповідними об'єктами. Важливим інструментом сучасних досліджень природно-технічних геосистем є ГІС-технології.

Завданням Дністровської гідроакумуючої електростанції (ГАЕС) є регулювання пікових навантажень в електричній мережі в такий спосіб: вода закачується з резервуара гідроелектростанції до резервуару гідроакумуючої електростанції, який розта-

шований на висоті 150 м (рис. 1). При цьому споживання електроенергії з мережі відбувається під час низьких робочих навантажень (тобто, в період низької потреби в електроенергії), а спуск води з резервуару через турбіни дає змогу давати електрику під час пікових (максимальних) навантажень (ПрАТ..., 2023).

Необхідність регулювання виробничих навантажень здебільшого визначається низькими маневровими якостями атомних електростанцій (тобто, їхньою здатністю регулювати свій режим виробництва електроенергії). Спочатку в Дністровський гідроенергетичний комплекс входила атомна електростанція, що і послужило причиною включення ГАЕС у цей комплекс. Під час детального розгляду об'єкта в профілі (рис. 2) стає очевидним, що він складається з елементарних компонентів таких як:

- підземний комплекс споруд;
- надземний комплекс споруд.



Рис. 1. Вигляд на Дністровську ГАЕС (Економічна..., 2023).

До надземного комплексу споруд належать:

- верхня водойма;
- водоприймач;
- будівля ГАЕС;
- водовипуск;
- нижня водойма (зарегульована частина р. Дністер).

До підземного комплексу споруд належать:

- напірні підвідні водоводи;
- напірні відвідні водоводи;
- шахта гідроагрегатів;
- дренажні штольні.

Верхнє водосховище разом з водоприймачем (аванкамера), розташовано на плато 125 м вище від рівня р. Дністер і побудоване шляхом виїмки та насипу ґрунту в екран дна і дамб обгородження висотою до 20 м (рис. 3). Загальний об'єм водосховища 41,43 млн м³, площа дзеркала при НІР – 2,61 км² (Мудра, 2017; Про..., 2022). Нижня водойма Дністровської ГАЕС має загальний об'єм 58,10 млн м³, площа дзеркала при НІР – 7,30 км² (Про..., 2022; ПрАТ..., 2023).

Від верхньої водойми до агрегатних шахт будівлі ГАЕС, підходять 7 ниток напірних водоводів кожна нитка яких включає:

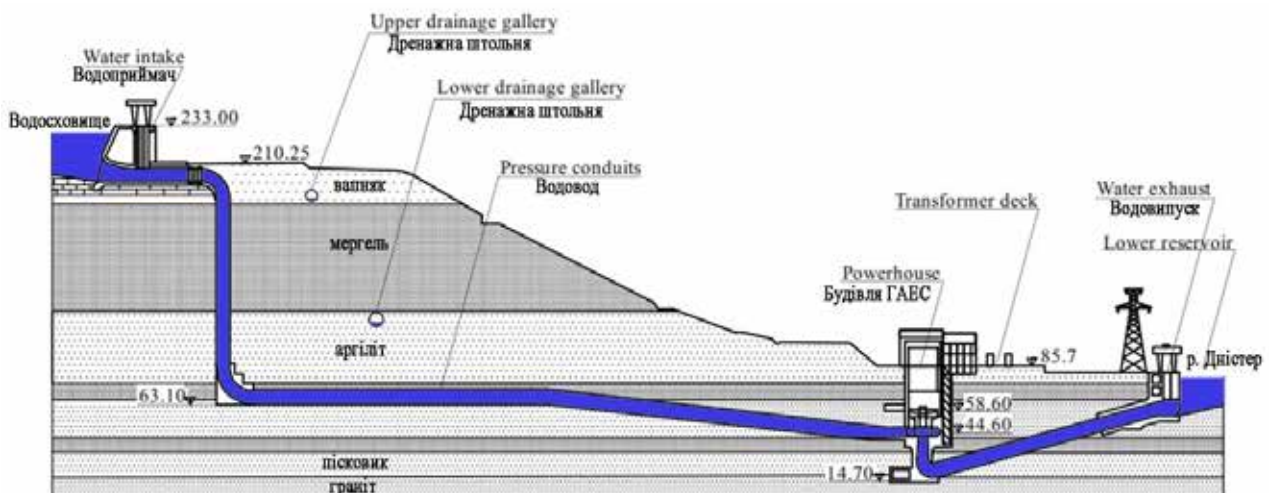


Рис. 2. Поздовжній профіль основних споруд Дністровської ГАЕС (Savchyn & Pronyshyn, 2020)



Рис. 3. Вигляд на верхню водойму Дністровської ГАЕС (ПрАТ..., 2023)

– вертикальна ділянка зі сталобетонним кріпленням заввишки близько 100 м, діаметром 7,5 м.

– горизонтальна ділянка діаметром 7,5 метрів, завдовжки близько 400 м.

Матеріал і методи

Останніми роками актуальність вивчення температурних змін у водних ресурсах помітно зросла на тлі глобальних кліматичних змін та їхнього впливу на екосистеми й енергетику.

Різноманітність методик і підходів, які використовують дослідники по всьому світу, демонструє міжнародне визнання цієї проблематики, а також відмінності в умовах проведення подібних досліджень у різних географічних регіонах. Серед зарубіжних дослідників темою дослідження температури води р. Дністер займалися молдавські вчені (Corobov, 2013; Kovalyshyna, 2021), дослідження націлені на гідроекологічні аспекти фітопланктону та зміни хімічного складу води в р. Дністер внаслідок зміни температурного режиму. Серед вітчизняних дослідників варто згадати (Лобода, 2009; Мудра, 2017; Семанюк і Гриб, 2021), автори пов'язують підвищення температури води у верхів'ях Дністра з глобальним потеплінням. Дослідження температурного балансу ділянки зрегульованого русла нижньої водойми Дністровського каскаду ГЕС та ГАЕС, не проводились.

У період з 2021 по 2022 рік були проведені синхронні заміри температури води, що скидається Дністровською гідроелектростанцією (ГЕС) у буферне водосховище

безпосередньо біля дамби ГЕС, а також температури води у місці водозабору Дністровської гідроакumuлюючої електростанції (ГАЕС) та у верхній водоймі ГАЕС.

За вказаний період було отримано 27309 значень температури, що забезпечує основу даних для детального аналізу градієнтів температур води в зоні експлуатації енергетичного каскаду, даючи змогу глибше та точніше зрозуміти алгоритм формування фонові температури локальної частини р. Дністер. Замір показників температур, проведений в середній течії річки, та на середній глибині водосховища.

Результати

Дністровська гідроакumuлююча електростанція (ГАЕС) розташована нижче за течією від Дністровської гідроелектростанції (ГЕС). У рамках своєї операційної діяльності, Дністровська ГЕС здійснює скидання води з нижніх шарів Дністровського водосховища. У зв'язку зі значною глибиною водосховища, яка сягає 54 метрів, забір води здійснюється з глибоких шарів (Zyhar, 2023; Zyhar et al., 2023).

Це призводить до стабілізації температури води, що скидається, оскільки вода з глибинних шарів характеризується меншими температурними коливаннями, порівняно з поверхневими шарами. У результаті, температура води, що скидається в буферне водосховище, залишається відносно стабільною.

Ця особливість гідрологічного режиму впливає на термічні умови нижнього водо-



Рис. 4. Вигляд на буферну водойму Дністровської ГАЕС (ПрАТ..., 2023)

сховища і, отже, на роботу ГАЕС, розташованої нижче за течією (рис. 5).

Під час дослідження було узагальнено та проілюстровано на графіку, що відображає зміни температури води в буферному водосховищі біля точки водозабору Дністровської гідроакumuлюючої електростанції (ГАЕС), а також у верхній водоймі цієї ж станції. Примітно, що впродовж усього періоду спостережень температура води в точці скидання Дністровської гідроелектростанції

(ГЕС) залишалася відносно стабільною і становила 11,3 градуса Цельсія з коливаннями в межах $\pm 0,5$ градуса (рис. 6).

Виходячи з отриманих результатів можна зробити висновок, що різниця температур між верхньою водоймою Дністровської ГАЕС і буферним водосховищем сприяє перемішуванню води в точках скидання і забору ГАЕС.

Це призводить до зниження фонові температури в буферному водосховищі

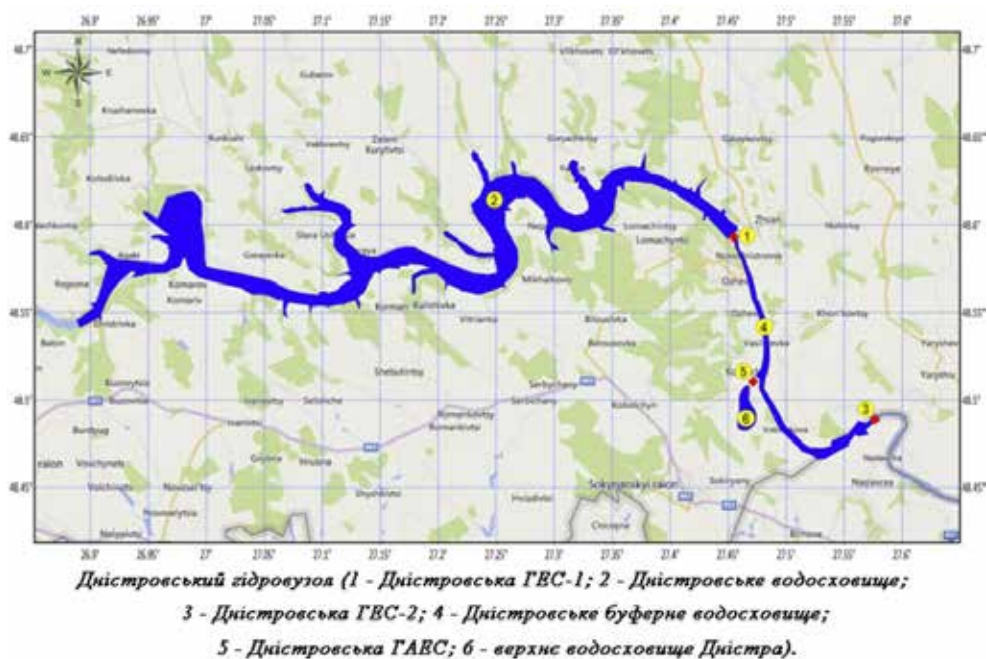


Рис. 5. Мапа розташування об'єктів (Savchyn & Pronyshyn, 2020)

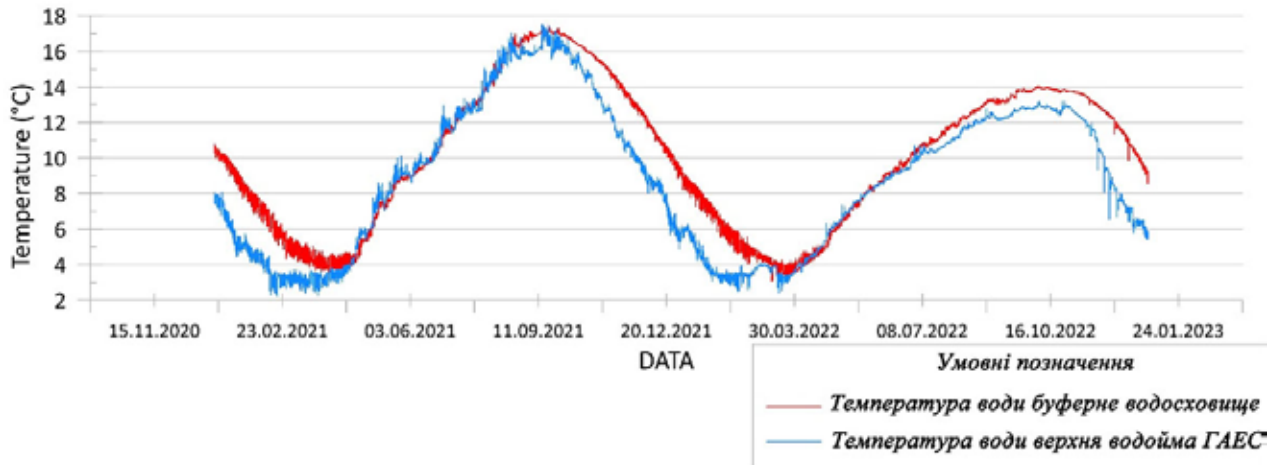


Рис. 6. Графік коливання температури води

впродовж майже всього періоду експерименту. Однак, у літній період температурний градієнт верхньої водойми здатен сприяти незначному підвищенню температури в буферному водосховищі. Ці спостереження підкреслюють важливість урахування температурних градієнтів для розуміння термодинамічних процесів у системі водосховищ ГАЕС.

Для більш переконливої оцінки результатів дослідження також було застосовано ГС-орієнтований підхід (Зацерковний та ін., 2018), заснований на аналізі космічних знімків, отриманих за допомогою місії

Landsat-8 (EarthExplorer..., 2023). Під час цієї роботи було виконано необхідні перетворення та корекції вихідних даних, що дало змогу створити термальну карту досліджуваного регіону (Bala et al., 2020; Zyhar, 2023; Zyhar et al., 2023). Ця карта надає візуальне уявлення про розподіл температур у регіоні, що є важливим доповненням до основного аналізу і сприяє глибшому розумінню термодинамічних процесів у зоні експлуатації каскадів ГЕС та ГАЕС (рис. 7).

На основі аналізу термальної мапи стає очевидною кореляція між космічними знімками та інструментальними вимірюван-

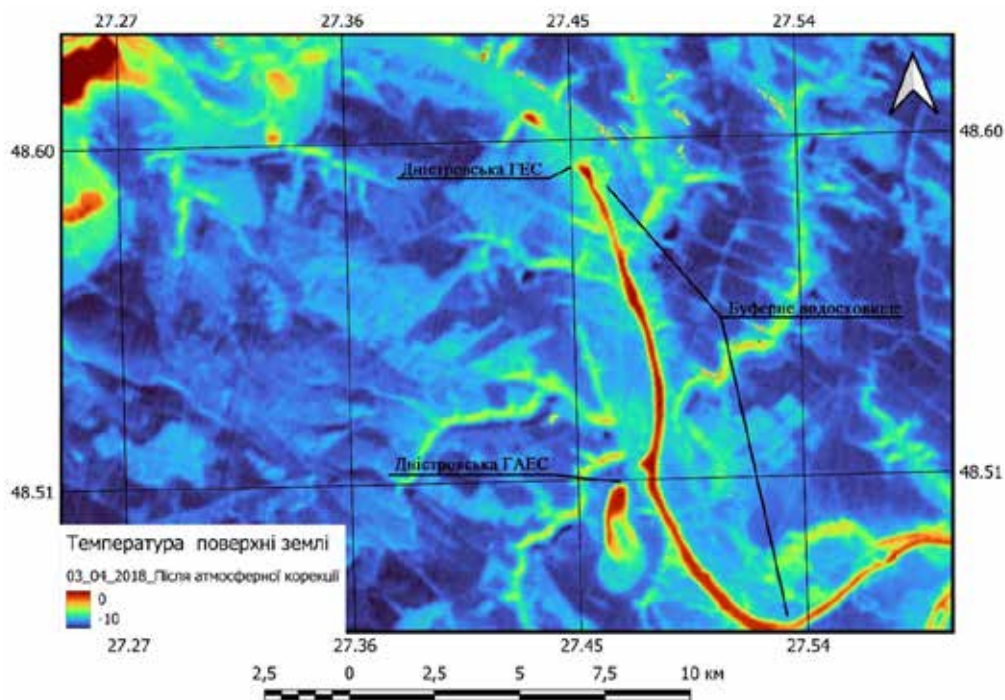


Рис. 7. Термомапа розподілу тепла в зоні експлуатації ГЕС та ГАЕС

нями. Чітко простежується, що у верхній водоймі Дністровської ГАЕС відбувається змішування води, її охолодження, а також дозоване скидання в буферне водосховище. Ці дані підтверджують динамічні процеси у водній системі, що має важливе значення для розуміння теплового балансу в регіоні.

Обговорення

Виходячи з отриманих результатів, можна констатувати, що температурні градієнти між верхньою водоймою Дністровської ГАЕС і буферним водосховищем відіграють ключову роль у процесах перемішування води в точках скидання і водозабору.

Це явище призводить до зниження фонові температури в буферному водосховищі протягом більшої частини експериментального періоду. Однак у літній період температурний градієнт у верхній водоймі сприяє помірному підвищенню температури в буферному водосховищі.

Ці спостереження підкреслюють значущість урахування температурних градієнтів для розуміння термодинамічних процесів у системі водосховищ ГАЕС.

Висновки

Застосування ГС-орієнтованого підходу, що ґрунтується на аналізі даних з місії Landsat-8, дало змогу провести глибокий аналіз термодинамічних процесів у досліджуваному регіоні. Трансформація і корекція первинних супутникових даних призвела до створення термальної карти, яка візуально ілюструє розподіл температур і підтверджує динамічні процеси у водній системі, включно зі змішуванням, охолодженням води і контрольованим скиданням у буферне водосховище.

Це забезпечує цінне доповнення до інструментальних вимірювань, поглиблюючи розуміння впливу температурних умов на екосистему та тепловий баланс у регіоні експлуатації ГЕС і ГАЕС. Примітно, що подібні умови теоретично можуть чинити позитивний вплив на атмосферний термобаланс усього регіону, виступаючи як компенсатор.

Температурний режим води буферного водосховища є прийнятним для зариблення цінних порід лососевих риб, зокрема дзеркальної форелі, що може сприяти економічному розвитку регіону.

Список використаної літератури

Економічна правда. Дністровська ГАЕС стала найбільшою в Європі. *Економічна правда* [Електронний ресурс]. URL: <https://www.epravda.com.ua/news/2021/12/24/680955/> (дата звернення 16.04.2024).

Зацерковний В.І., Оберемок Н.В., Березіна П.О. Spatial-temporal analysis of the “islands of heat” of the metropolis for satellite images Landsat. *Science-based technologies*. 2018. Vol. 37. № 1. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.37.12377>.

Лобода Н., Сіренко А. Вплив глобального потепління на льодовий режим річки Дністер. *Науковий вісник Чернівецького університету*. 2009. № 480 (481). С. 200–204.

Мудра К.В. Відновлення стоку води на гідрологічних постах річки Дністер з метою вивчення його довгоперіодних коливань. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2017. Т. 2. № (45). С. 30–39.

ПрАТ Укргідроенерго. Укргідроенерго – провідна гідрогенеруюча компанія в Україні. *Укргідроенерго* [Електронний ресурс]. URL: <https://uhe.gov.ua/> (дата звернення 16.04.2024).

Про затвердження Правил експлуатації водосховищ Дністровського комплексного гідровузла : Наказ М-ва зах. довкілля та природ. ресурсів України від 27.05.2022 р. № 209 [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0635-22#Text> (дата звернення 16.04.2024).

Семанюк, К.І., Гриб О.М. Оцінка змін абіотичних чинників (об'ємів стоку, рівнів та температур води) гідроекологічного режиму Нижнього Дністра за період з 1945 по 2018 рр. *Матеріали науково-практичної конференції Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт зі спеціальності «Екологія»*. 2021. С. 17–19.

Bala R., Prasad R., Yadav V.P. Thermal sharpening of MODIS land surface temperature using statistical downscaling technique in urban areas. *Theoretical and applied climatology*. 2020. Vol. 141. № 3–4. P. 935–946. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03253-w>.

Corobov R. (ed). Assessment of climate change vulnerability at the local level: a case study on the dniester river basin (moldova). *The scientific world journal*. 2013. Vol. 2013. P. 1–13. <https://doi.org/10.1155/2013/173794>.

EarthExplorer. *EarthExplorer*. [Електронний ресурс] URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата звернення 16.04.2024).

Kovalyshyna S. (ed). Ecological conditions of the lower Dniester and some indicators for assessment of the hydropower impact. *Applied sciences*. 2021. Vol. 11. № 21. P. 9900. <https://doi.org/10.3390/app11219900>.

Radkevych A. (ed). Overview of technologies for constructing the facilities at the Dniester pumped storage power station. *Mining of mineral deposits*. 2019. Vol. 13. № 3. P. 31–39. <https://doi.org/10.33271/mining13.03.031>.

Savchyn I., Pronyshyn R. Differentiation of recent local geodynamic and seismic processes of tectonogenic-loaded territories based on the example of Dniester Hydro Power Complex (Ukraine). *Geodesy and geodynamics*. 2020. Vol. 11. № 5. P. 391–400. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.06.001>.

Zyhar A. (ed). Geodynamics. *Geodynamics*. 2021. Vol. 1 (30). P. 17–24. <https://doi.org/10.23939/jgd2021.01.017>.

Zyhar A. Geodynamics. *Geodynamics*. 2023. Vol. 1 (34). P. 19–27. <https://doi.org/10.23939/jgd2023.01.019>.

Zyhar A., Yushchenko Y., Savchyn I. Geodesy, cartography and aerial photography. *Geodesy, cartography and aerial photography*. 2023. Vol. 97. 2023. № 97. P. 24–31. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.97.024>.

Zyhar A., Zayats I., Zakrevskyi O. GIS-Oriented approach to analyzing the causes of water displays on hydraulic structures. *International conference of young professionals «geoterrace-2023»*. Lviv, 2023. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510037>.

References (translated and transliterated)

Ekonomichna pravda. Dnistrovska HAES stala naibilshoiu v Yevropi. [Economic truth. The Dniester PSPP has become the largest in Europe]. *Ekonomichna pravda [Economic truth]*. [Electronic resource] URL: <https://www.epravda.com.ua/news/2021/12/24/680955/> (access date 16.04.2024) [in Ukrainian].

Zatserkovnyi, V.I., Oberemok, N.V., & Berezina, P.O. (2018). Spatial-temporal analysis of the «islands of heat» of the metropolis for satellite images Landsat. *Science-based technologies*, 37 (1). <https://doi.org/10.18372/2310-5461.37.12377> [in Ukrainian].

Loboda, N., & Sirenko, A. (2009). Vplyv hlobalnoho poteplynnia na lodovyi rezhym richky Dniester [The impact of global warming on the ice regime of the Dniester River]. *Naukovyi visnyk Chernivets'koho universytetu [Scientific Bulletin of Chernivtsi University]*, 480 (481), 200–204 [in Ukrainian].

Mudra, K.V. (2017). Vidnovlennia stoku vody na hidrolohichnykh postakh richky Dniester z metoiu vyvchennia yoho dovhoperiodnykh kolyvan [Recovery of water flow at the hydrological stations of the Dniester River to study its long-term fluctuations]. *Hidrolohiiia, hidrokhemiiia i hidroekolohiiia [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology]*, 2 (45), 30–39 [in Ukrainian].

PrAT Ukrhydroenerho. Ukrhydroenerho – providna hidroheneruiucha kompaniia v Ukraini [Ukrhydroenergo is a leading hydroelectric generating company in Ukraine]. *Ukrhydroenerho [Ukrhydroenergo]*. [Electronic resource] URL: <https://uhe.gov.ua/> (access date 16.04.2024) [in Ukrainian].

Pro zatverdzhennia Pravyl ekspluatatsii vodoskhovyshch Dnistrovskoho kompleksnoho hidrovuzla : Nakaz M-va zakh. dovkillia ta pryrod. resursiv Ukrainy vid 27.05.2022 r. № 209 [On approval of the Rules for the operation of the reservoirs of the Dniester complex hydroelectric complex: Order of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine of 27.05.2022 r. № 209]. [Electronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0635-22#Text> (access date 16.04.2024) [in Ukrainian].

Semanyuk, K.I., & Grib, O.M. (2021). Otsinka zmin abiotichnykh chinnikov (oB'emiv stoku, rivniv ta temperatur vodi) gidroekologichnogo rezhimu Nizhn'ogo Dnistra za period z 1945 po 2018 [Assessment of changes in abiotic factors (flow volumes, water levels and temperatures) in the hydroecological regime of the Lower Dniester over the period from 1945 to 2018]. *Materialy naukovopraktychnoyi konferentsiyi Vseukrayins'koho konkursu student's'kykh naukovykh robot zi spetsial'nosti «Ekolohiia» [Materials of the scientific and practical conference of the All-Ukrainian competition of student scientific papers in the specialty «Ecology»]*, 17–19 [in Ukrainian].

Bala, R., Prasad, R., & Yadav, V.P. (2020). Thermal sharpening of MODIS land surface temperature using statistical downscaling technique in urban areas. *Theoretical and applied climatology*, 141 (3–4), 935–946. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03253-w> [in English].

Corobov, R. (ed.) (2013). Assessment of climate change vulnerability at the local level: a case study on the Dniester river basin (Moldova). *The scientific world journal*, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2013/173794> [in English].

EarthExplorer. *EarthExplorer*. [Electronic resource] URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (access date 16.04.2024) [in English].

Kovalyshyna, S. (ed.) (2021). Ecological conditions of the lower Dniester and some indicators for assessment of the hydropower impact. *Applied sciences*, 11 (21), 9900. <https://doi.org/10.3390/app11219900> [in English].

Radkevych, A. (ed.) (2019). Overview of technologies for constructing the facilities at the Dniester pumped storage power station. *Mining of mineral deposits*, 13 (3), 31–39. <https://doi.org/10.33271/mining13.03.031> [in English].

Savchyn, I., & Pronyshyn, R. (2020). Differentiation of recent local geodynamic and seismic processes of technogenic-loaded territories based on the example of Dniester Hydro Power Complex (Ukraine). *Geodesy and geodynamics*, 11 (5), 391–400. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.06.001> [in English].

Zyhar A. (ed.) (2021). Geodynamics. *Geodynamics*, 1 (30), 17–24. <https://doi.org/10.23939/jgd2021.01.017> [in English].

Zyhar, A. (2023). Geodynamics. *Geodynamics*, 1 (34), 19–27. <https://doi.org/10.23939/jgd2023.01.019> [in English].

Zyhar, A., Yushchenko, Y., & Savchyn, I. (2023). Geodesy, cartography and aerial photography. *Geodesy, cartography and aerial photography*, 97 (97), 24–31. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.97.024> [in English].

Zyhar, A., Zayats, I., & Zakrevskyi, O. (2023). GIS-Oriented approach to analyzing the causes of water displays on hydraulic structures. *International conference of young professionals «geoterrace-2023»*. Lviv <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510037> [in English].

Отримано: 29.04.2024

Прийнято: 10.05.2024



УДК 631.4 (477.42)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.11>

ТРАНСФОРМАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ҐРУНТОУТВОРЕННЯ У МЕЖАХ ДАВНЬОГО ПОСЕЛЕННЯ НЕПОДАЛІК С. СКОЛОБІВ НА ЖИТОМИРЩИНІ: ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИЙ АНАЛІЗ

Ж. М. Матвіїшина¹, О. Г. Пархоменко²

Важливим завданням сучасної палеогеографії став прогноз розвитку географічного середовища в умовах тривалих та швидких природних та антропогенних змін. Цю проблему неможливо вирішити без детального дослідження еволюції географічного середовища з початку виникнення до теперішнього часу. Одним із способів вивчення цієї еволюції є дослідження трансформаційних процесів у ґрунтах, як об'єктах, що здатні фіксувати та відображувати еволюцію природного та антропогенного середовища. Лише на основі пізнання історії розвитку ґрунтів, трансформації педогенезу можна отримати цілісну уяву про сучасний стан та організацію ґрунтового покриву, а також здійснити прогноз подальшого розвитку ґрунтів та ландшафтів території дослідження. Дослідження сучасних ґрунтів, як і давніх, повинно базуватися на вивченні геологічних та археологічних пам'ятників, де найповніше відображена історія їх розвитку. Методичні прийоми палеогеографії базуються на вивченні пам'ятників давньої природи. Так, для аналізу змін ґрунтів важливим є ґрунтово-археологічні методи дослідження (палеопедологічний, мікроморфологічний, геоархеологічний тощо), які використовуються для реконструкції природних умов проживання давньої людини. Давні поселення є чудовим об'єктом, де можна дослідити ґрунти давніх епох для порівняння їх із сучасними, щоб визначити спрямованість ґрунтових процесів, встановити ймовірні зміни природи та клімату у майбутньому. У первинних ознаках зафіксовано особливості профілю ґрунту часу існування давнього поселення. Яскравим прикладом трансформації палеообстановок минулого є палеоґрунти, досліджені нами неподалік с. Сколобів на Житомирщині, де нами встановлено, що в межах давнього поселення відбулася трансформація лісових ґрунтів на дернові, дерново-підзолисті. У X–XIII ст. природні зони були зміщені на північ з проявом аридніших умов при достатньому і навіть надлишковому зволоженні з ознаками оглеєння. Ці дослідження мають істотне значення не лише для палеогеографії, але й для археології, ґрунтознавства, історії та інших природничих та суспільних наук.

Ключові слова: ґрунт, ґрунтовий профіль, палеопедологічний метод, геоархеологічний підхід.

¹ доктор географічних наук, професор,
завідувач сектору палеогеографії
(Інститут географії НАН України, м. Київ)
e-mail: zhmatviishyna@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1412-7232

² кандидат географічних наук, доцент,
доцент кафедри екології, географії та природокористування
(Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка, м. Чернігів)
e-mail: sasho1979turizm@ukr.net
ORCID: 0000-0001-7939-9576

TRANSFORMATION OF SOIL FORMATION PROCESSES WITHIN THE BOUNDARIES OF THE ANCIENT SETTLEMENT NEAR THE VILLAGE OF SKOLOBIV IN THE ZHYTOMIR REGION: SPACE-TIME ANALYSIS

Zh. M. Matviishyna, O. H. Parkhomenko

An important task of modern paleogeography has become the forecast of the development of the geographical environment in the conditions of long-term and rapid natural and anthropogenic changes. This problem cannot be solved without a detailed study of the evolution of the geographical environment from the beginning of its emergence to the present time. One of the ways of studying this evolution is the study of transformation processes in soils, as objects capable of recording and reflecting the evolution of the natural and anthropogenic environment. Only on the basis of knowledge of the history of soil development, the transformation of pedogenesis, it is possible to get a holistic idea of the current state and organization of the soil cover, as well as to make a forecast of the further development of soils and landscapes of the study area. The study of modern soils, as well as ancient ones, should be based on the study of geological and archaeological monuments, where the history of their development is most fully reflected. Methodical methods of paleogeography are based on the studied monuments of ancient nature. Thus, for the analysis of soil changes, soil-archaeological research methods (paleopedological, micromorphological, geoarchaeological, etc.) are important, which are used to reconstruct the natural conditions of ancient human habitation. Ancient settlements are an excellent object, where you can study the soils of ancient eras to compare them with modern ones, to determine the orientation of soil processes, to establish probable changes in nature and climate in the future. The features of the soil profile during the existence of the ancient settlement are recorded in the primary signs. A vivid example of the transformation of past paleoenvironments is the paleo-soils we investigated near the village of Skolobiv in Zhytomyr Region, where we established that within the boundaries of the ancient settlement, forest soils were transformed into sod, sod-podzolic soils. In the 10th–13th centuries, the natural zones were shifted to the north with the manifestation of more arid conditions with sufficient and even excessive moistening with signs of glaciation. These studies are of significant importance not only for paleogeography, but also for archaeology, soil science, history, and other natural and social sciences.

Key words: soil, soil profile, paleopedological method, geoarchaeological approach.

Вступ

У наш час проблема вивчення еволюції ґрунтів та формування ландшафтів є однією з найбільш актуальних у ґрунтознавстві і являє значний інтерес для багатьох природничих та гуманітарних наук. Вона має не лише теоретичне, але й практичне значення. Лише на основі пізнання історії розвитку ґрунтів, вивчення швидкості їх утворення та еволюції можна отримати цілісне уявлення про сучасний стан і організацію ґрунтового покриву, а також дати прогноз подальшого розвитку ґрунтів і ландшафтів. Інтерес до цієї проблеми підтверджується численними публікаціями з інтерпретації даних щодо похованих ґрунтів у зв'язку з антропогенним навантаженням на природні комплекси та еволюцією природного середовища у голоцені. Важливу роль в інтерпретації даних з використанням педологічних методів відіграли дослідження (Веклич, 2001; Яцишин, 2009; Gerasimenko, 2011; Степанчук та ін., 2013; Матвіїшина та ін., 2017; Дорошкевич, 2018; Hildebrandt-Radke et al., 2019; Matviishyna,

2021a, 2021b; Матвіїшина, 2023; Gavryliuk et al., 2023; Kiosak & Matviishyna, 2023).

Матеріал і методи

Останнім часом палеopedологічний підхід, а також метод хронорядів (геоархеологічний підхід) активно використовуються під час палеогеографічних досліджень для реконструкції умов природного середовища проживання давньої людини на конкретних археологічних пам'ятках. Врахування історії розвитку ґрунтів дозволяє по новому підійти до проблем формування профілю сучасних ґрунтів, коли окремі генетичні горизонти можуть бути пояснені не лише як плід єдиного ґрунтоутворювального процесу, але і як окремі частини інтегрованого профілю, що сформувалися в різних і змінних кліматичних умовах. У цьому контексті цікавим для дослідження є ґрунти давніх поселень, в яких у первинних ознаках зафіксовано особливості профілю ґрунту часу існування поселення, що дозволяє вивчати антропогенну еволюцію ґрунтів. На території дослідження ґрунти співставлялися з культурними шарами давнього

поселення і вивчалися з використанням комплексу палеопедологічних методів (насамперед, макро- та мікроморфологічного (Кармазиненко, 2010). Отримані дані дають інформацію про трансформації ґрунтового профілю під впливом природних та антропогенних факторів.

Останнім часом нами досліджено ґрунти давніх поселень різних часів Черкащини, Житомирщини тощо (Матвіїшина і Пархоменко, 2019; Матвіїшина, 2021a, 2021b; Матвіїшина & Пархоменко, 2022) з метою реконструкції палеобстановок минулого. Суцільне палеопедологічне обстеження територій стає надійним джерелом, без якого неможливо уявити якісні зміни в усіх сферах життя давнього суспільства. Так, створено базу даних палеоґрунтознавчих досліджень голоцену в межах рівнинної частини України на основі ПС-технологій (Кушнір і Лейберюк, 2022).

Результати

У 2012 році за запрошенням співробітників Науково-дослідного центру «Рятівна археологічна служба» Інституту археології НАН України у м. Львові під керівництвом директора Осаульчука О.М. нами проведено палеопедологічне дослідження давньоруського поселення (X–XIII ст.) з артефактами (Сколобів-2) неподалік с. Сколобів (Володарськ-Волинського району) Житомирщини. Пам'ятка Сколобів-2 розташована за 750 м на північ від с. Сколобів, за 1,1 км на південний захід від с. Давидівка, за 600 м, на лівому березі р. Ірша. Пам'ятка

у ландшафтному відношенні розташована в межах області Поліської провінції зони змішаних лісів Східно-Європейської рівнини, а саме Житомирського Полісся. Розташування Житомирського Полісся у північно-західній частині Українського кристалічного щита обумовило його ландшафтні особливості. Це більш високий рівень території (180-200 м) у порівнянні із іншими поліськими областями, меншій заболоченості, наявності корисних копалин, пов'язаних із кристалічними породами. Річкові долини часто пов'язані із тектонічними лініями, вони порівняно вузькі та більш глибокі, ніж у сусідніх поліських областях. Досліджувана пам'ятка входить до складу Володарськ-Волинської моренно-зандрової рівнини.

Нами досліджено розрізи ґрунтів ключової ділянки як у межах давнього поселення (розчистка № 1), так і поза його межами (фоновий ґрунт у розчистці № 2) (рис. 1).

Із розчисток відібрано зразки на мікроморфологічний аналіз, здійснено польові масштабні зарисовки з примазками натурального матеріалу, проведено детальний морфологічний опис та мікроморфологічний аналіз в 11 зразках ґрунтів під мікроскопом в непорушеному стані, що дає вагомі результати при уточненні генезису ґрунтів, оскільки фіксує деталі мікробудови, що не помітні під час вивчення іншими методами. Особливо ефективно його використання для відтворення первинних ґрунтоутворювальних процесів. Методика досліджень перед-

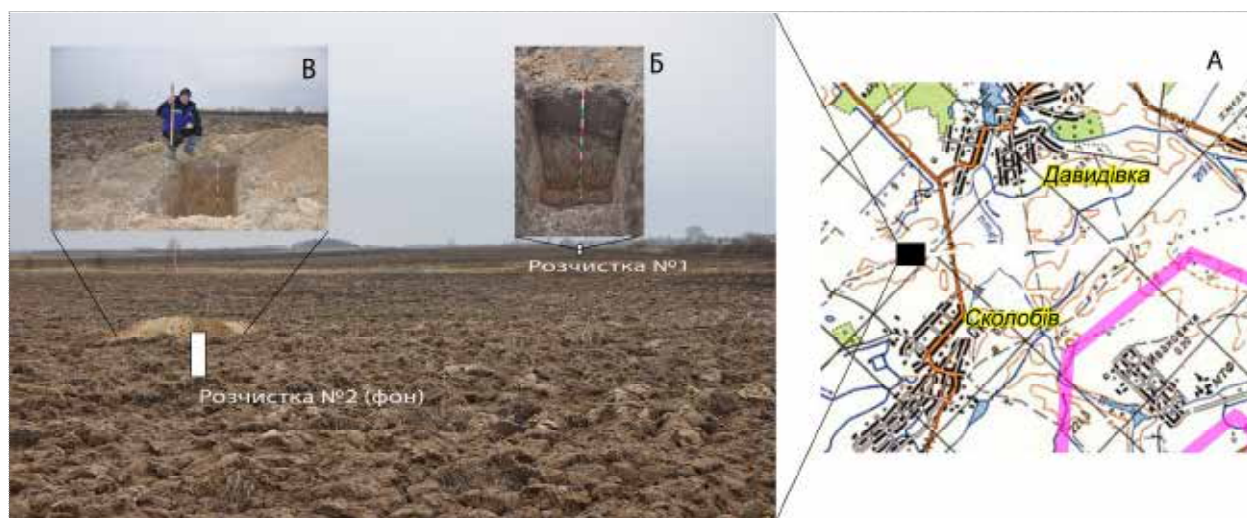


Рис. 1. Ключова ділянка дослідження пам'ятки Сколобів-2: А – загальний вигляд території дослідження (місце розташування); Б – розчистка № 1 в межах давнього поселення; В – розчистка № 2 (фоновий або сучасний ґрунт)

бачала порівняння профілів ґрунтів на археологічних пам'ятниках – давніх поселеннях і фонових (за межами поселень). Аналіз профілів з наявністю даних датування за археологічними культурами дозволяє реконструювати загальні особливості давніх ґрунтів у порівнянні із сучасними фоновими, щоб встановити тренди розвитку.

У розчистці № 1 (рис. 2) ґрунту часу існування давнього поселення наявні такі генетичні горизонти.

Hd – 0,0–0,1 м – темно-сірий до чорного, пухкий, легкий піщано-пилуватий суглинок, з великою кількістю корінців трав.

Неорн. – 0,1–0,35 м – темно-сірий до чорного, пухкий, грудкувато-розсипчастий, в сухому стані сизуватий, з численними корінцями трав, з присипкою SiO₂, зустрічаються кротовини з темно-сірим матеріалом (5–6 см в діаметрі). Внаслідок супіщаного складу матеріалу не мали можливості виготовити якісний шліф. Матеріал (рис. 3) світло-сірий з “відмитими” збагаченими на зерна мінерального скелету мікроділянками, подекуди маса профарбована гумусом.

Н(е)орн. – 0,35–0,5 м – світло-сірий до темно-сірого, переритий кротовинами заповненими темним і світло-сірим матеріалом, з червоточинами, неоднорідно забарвлений внаслідок наявності кротовин і червоточин, з присипкою SiO₂, піщано-пилуватий лег-

кий суглинок, світлішає до низу, основний фон сірий, забарвлений гумусом, з тонкими корінцями трав. У шліфі з нижньої частини гумусового горизонту матеріал світло-сірий, роздільно-мікроагрегований, пластівцевоподібний, з помітними звивистими обрисами мікроагрегатів з гумусом до III-IV порядку. Гумус скоагульований, матеріал пухкого складення, губчастої структури, з інтенсивно розвиненою системою пор, у скелеті переважають крупнопилуваті часточки з поодинокими окатаними зернами піску (до 0,4 мм в діаметрі). Є “відмиті” ділянки, маса пухкого складення, що є результатом оранки.

Phegl – 0,5–0,65 м – світло-сірий, з буруватим відтінком, супіщаний, з марганцевою пунктацією і бобовинами, грудкувато-розсипчастий, по ходам корінців і червоточин, є напливи гумусу з присипкою SiO₂. Під мікроскопом видно світло-сірий матеріал профарбований диспергованим гумусом, складений напівзруйнованими мікроагрегатами III-IV порядку, є “відмиті” ділянки, гумус скоагульований, однак наявні ознаки його переміщення в межах горизонту, нерівномірно профарбовує масу. Мінеральний скелет представлений великою кількістю крупнопилуватих зерен піску. Розвинена сітка звивистих пор, на окремих мікроділянках проявляються напливи коломорфних глин біля пор і в масі. Переважають

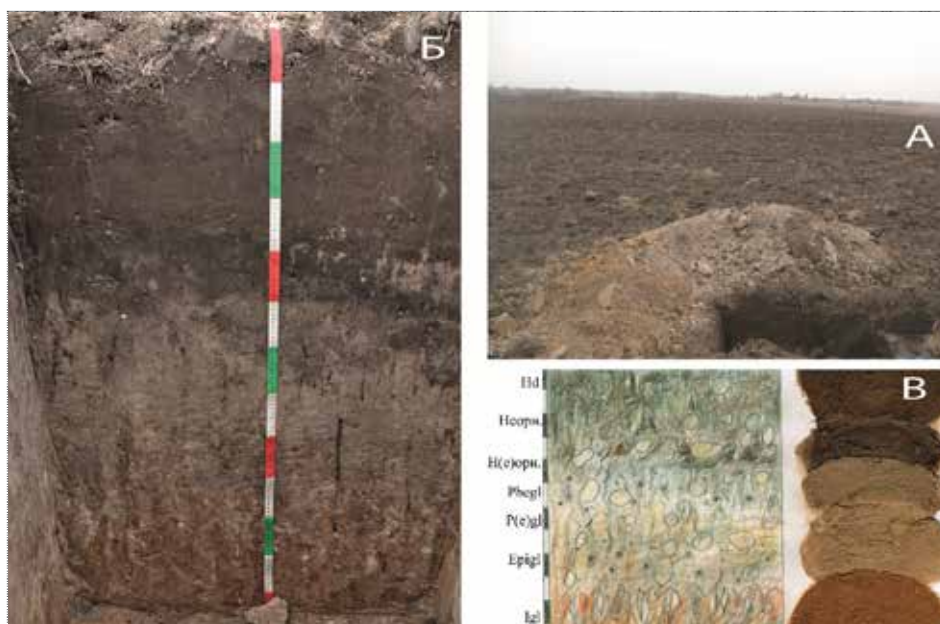


Рис. 2. Генетичні горизонти ґрунту у розчистці № 1 (у межах давнього поселення): А – загальний вигляд розчистки № 2; Б – фото розчистки; В – кольорова польова замальовка з примазками натурального матеріалу (автор Матвіїшина Ж.М.)

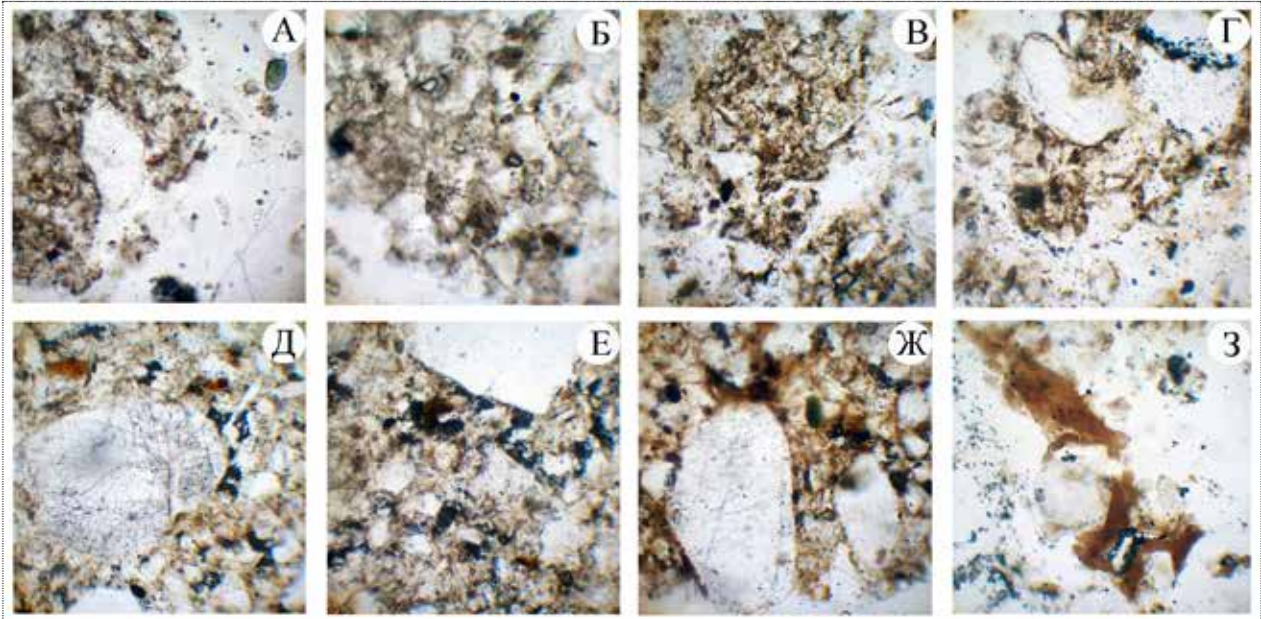


Рис. 3. Сколобів-2, розчистка № 1. Мікробудова дерново-підзолистого легкосуглинкового ґрунту давньоруського поселення (X–XIII ст.): А, Б – мікроагрегати і “відмиті” ділянки гумусового горизонту; В, Г – мікроагрегати елювіально-гумусового горизонту, “відмиті” ділянки; Д, Е – мікробудова елювіального горизонту з “відмитими” ділянками; Ж – компактна мікробудова, напливи коломорфних глин в ілювіальному горизонті; З – скарлупчасті напливи коломорфних глин ілювіального горизонту. Зб. 100, нік.//.

“відмиті” ділянки. Ознаками переміщення глин і гідрооксидів заліза є нерівномірне профарбування маси. Маса пухка з розвиненою сіткою звивистих пор.

P(e)gl – 0,65–0,75 м – найсвітліший у розрізі, супіщано-піщаний, з червоточинами, заповненими гумусовою речовиною, з поступовою межею переходу до низу. У шліфах маса сірувато-світлобура, пухкого складення, профарбована диспергованим гумусом, розділена сіткою звивистих пор. Зерна мінерального скелету пухко упаковані у плазмі, наявні ознаки слабого переміщення глин. На окремих ділянках проявляються напливи коломорфних глин, збагачені на гумусову речовину. Мінеральний скелет представлений крупнопилуватими і окатаними зернами піску. Маса світла, мінеральний скелет займає до 80% площі шліфа. Слабке профарбування гумусом, багато “відмитих” ділянок.

Еpіgl – 0,75–0,95 м – темно-бурий, помітні бурі напливи (до 0,3 м в глибину), на інших ділянках матеріал з дрібними ортзандовими прошарками (1-2 см), з вертикально розташованими червоточинами, заповненими гумусом, супіщаний, багато кротовин світло-сірих, сірих, білястих, з великою кіль-

кістю присипки SiO_2 , з окремими плямами марганцю і пухкими Mn бобовинами, з озалізненням по вертикальним і горизонтальним напливам, перехід і межа напливні. Під мікроскопом помітно, що маса агрегована, сірувато-бурувата, з компактними округлими агрегатами, розділеними звивистими порами і порами-тріщинами. В незначній кількості всередині окремих агрегатів проявляються напливи коломорфних глин, що приурочені до пор. Маса не насичена коломорфними глинами, які зустрічаються поодинокі на деяких ділянках – ознаки процесу ілювіювання. Не проявляється значного озалізнення, гідрооксиди заліза лише профарбовують напливи коломорфних глин біля пор. Мінеральний скелет становить 70% площі шліфа, представлений зернами крупного пилу і середнього піску. Розвинені міжагрегатні і міжблокові пори.

Igl – 0,95–1,3 м – іржаво-бурий, піщано-пилуватий середній до важкого суглинок, на межі з I_2 горизонтом – зосередження по тріщинах SiO_2 в напливах до 2-3 см. В середній та нижній частині стає більш оглиненим і однорідним, менше напливів SiO_2 , мармуровидно забарвлений, пістрявий, з марганцевими плямами, поодинокими пля-

мами марганцю по ходам рослин. Моренні відклади під мікроскопом представлені бурим суглинком, озалізненим, насиченим коломорфними глинами, маса компактної мікробудови, помітні виокремлення коломорфної глини, що проявляються у вигляді плівок навколо пор, струмочків; глини жовтувато-червонуваті, з порами-тріщинами, які розділяють блоки, помітні пластівцеві агрегати з нечіткими краями. Процес ілювіювання пов'язаний з лісовим ґрунтоутворенням на первинних етапах розвитку та важким складом порід моренних відкладів. Ймовірно, спочатку тут формувався ліс, а згодом з полегшенням гранулометричного складу відкладів на відкритих просторах проявився дерновий процес.

Розчистка № 2 (фоновий ґрунт) (рис. 4) розташована в 150 м від розчистки № 1, представлена такими генетичними горизонтами.

Нд – 0,0–0,1 м – дернина з домішками коренів трав, бурувато-сірий, пухкий.

Неорн. – 0,1–0,3 м – бурувато-сірий, грудкувато-розсипчастий, легко-суглинстий, з окремими кротовинами (до 5-6 см у діаметрі), піщано-пилуватий легкий суглинок з плямами марганцю, великою кількі-

стю червоточин. У шліфах (рис. 5) матеріал світло-бурій, добре агрегований (мікроагрегати до III-IV порядку), чітко розвинена сітка міжагрегатних пор і менше внутрішньоагрегатних, зерна мінерального скелету пухко упаковані у плазмі, поровий простір займає майже 50% площі шліфа, гумус скоагульований частково, є "відмиті" ділянки збіднені на гумус. Мінеральний скелет представлений дрібно- і середньопіщаними окатаними зернами, вони частково з плівками і оболонками, складають до 70% площі шліфа. Переважають процеси виносу гумусу на глибину.

Нпе – 0,3–0,5 м – сірувато-темно-бурій, щільніший за вищележачий, з тонкими коренями трав, піщано-пилуватий середній суглинок, зернисто-грудкуватий, з червоточинами, заповненими гумусовим матеріалом, плямами присипки SiO_2 , поодинокими кротовинами. Перехід і межа поступові за появою ущільнення. У шліфах матеріал світло-сірий, з чітко розвиненими простими і складними агрегатами, розвиненою сіткою пор, основа мікроагрегатів – пластівці, згустки і нещільні грудочки гумусу, пори займають половину площі шліфа, помітні ознаки руху гумусово-залізистої речовини –

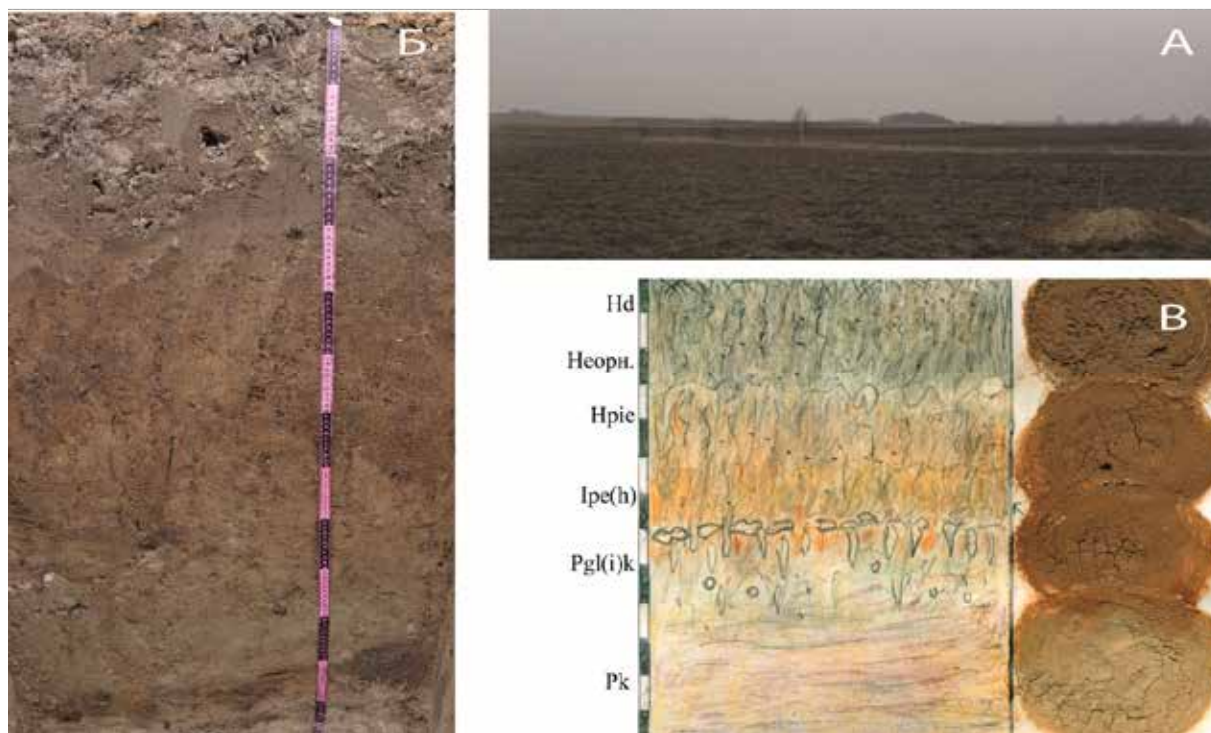


Рис. 4. Генетичні горизонти ґрунту в розчистці № 2 (фоновий): А – загальний вигляд розчистки № 2; Б – фото розчистки; В – кольорова польова замальовка з примазками натурального матеріалу (автор Матвіїшина Ж. М.)

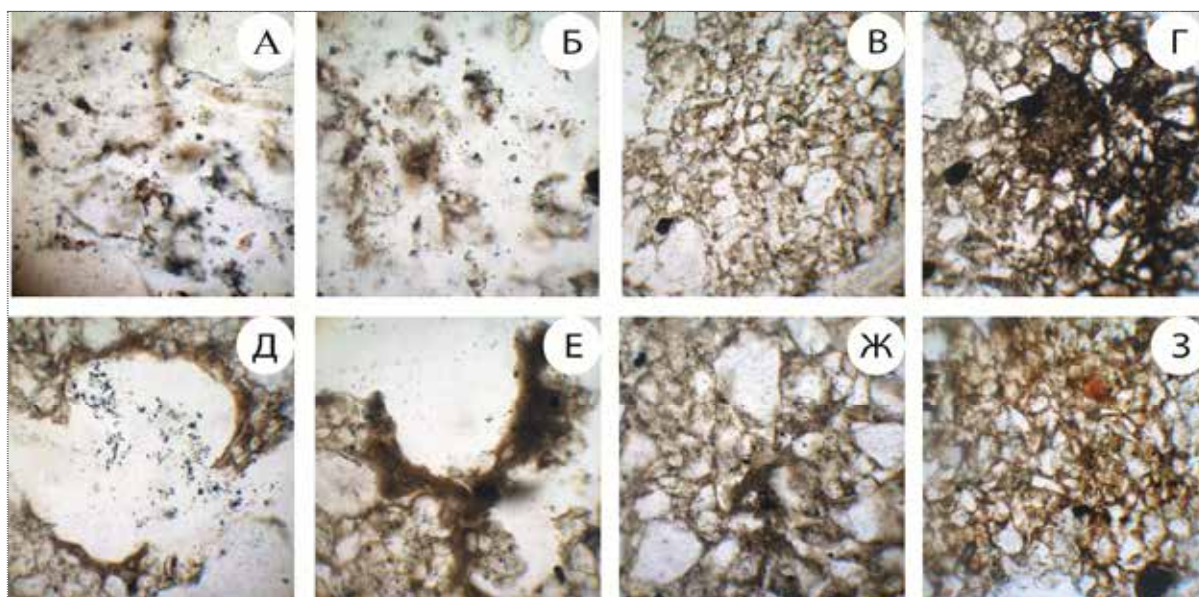


Рис. 5. Сколобів-2, розчистка № 2. Мікробудова окультуреного дерново-підзолистого ґрунту на карбонатних відкладах: А, Б – мікробудова орного горизонту; В, Г – мікробудова гумусово-елювіального горизонту; Д, Е – напливи коломорфних глин навколо пори в ілювіальному горизонті; Ж – піщано-суглинковий склад матеріалу; З – компактна упаковка зерен скелету в плазмі з інкрустацією пор коломорфними глинами, плями гідроксидів заліза. Зб. 100, нік.//

“відмиті” ділянки і виокремлення коломорфних глин по краях пор. Серед напливів зустрічаються тонкі скарлупчасті. У скелеті переважають крупнопилуваті часточки, піщані окатані зерна (розмірами до 0,7 мм). Мінеральний скелет складає до 80% площі шліфа.

I(h)pe – 0,5–0,75 м – жовтувато-бурий, ущільнений, зернисто-грудкуватий, з плямами SiO_2 , багато червоний, сірувато-бурі кротовини, піщано-пилуватий середній суглинок, з плямами марганцю, перехід і межа поступові. В нижній частині помітні тверді кремнисто-карбонатні конкреції на межі з піском. Під мікроскопом прослідковується бурий, складений у формі блоків матеріал, озалізнений, оглинений, блоки розділені слабо звивистими порами-тріщинами, складення плазмово-піщане, маса насичена коломорфними глинами у різних формах, більшість з них темно-бурого забарвлення.

Pgl(i)k – 0,75–0,9 м – бурувато-світло-сірий, з білястими плямами, шаруватий, оглеєний. У шліфах матеріал світло-бурий, складений у формі блоків, з присутністю зерен піску. Різноманітні форми виокремлення коломорфних глин (світло-жовтих, світло-бурих), які просочують плазму у вигляді шкарлупчастих напливів, утворюють струмочки і лусочки глин. Плазма

нерівномірно забарвлена гідроксидами заліза.

Pk – 0,9–1,3 м – сизувато-світло-сірий, сизий від оглеєння, з кремнисто-карбонатними конкреціями. Під мікроскопом спостерігається слабке просочення плазми крипто-кристалічним кальцитом, помітні пластівцеві агрегати, в меншій кількості зустрічається дрібнокристалічний кальцит. У масі проявляються глинисто-карбонатні агрегати. У скелеті переважають середні і крупні зерна пилу, поодинокі піщані зерна. Сітка звивистих пор розвинена, маса пухкого губчастого складення.

Обговорення

В розчистці № 1 представлено профіль окультуреного ґрунту, який давно розораний і покращується внесенням добрив, що дозволило сформуватися потужному дерново-підзолистому лісовому трансформувався в опідзолений. З поверхні (до 0,95 м) наявні всі ознаки розвитку дернового процесу, з 0,95 м і нижче – розміщується ілювіальний горизонт давнього лісового ґрунту по моренним відкладам (легким глинам), просоченим коломорфними колоїдами. По всьому профілю простежена присипка SiO_2 , ознаки опідзолення. Ґрунт – дерновий опідзолений оглеєний піщано-пилуватий, сформований

на морені. Спочатку він формувався як дерново-підзолистий, пізніше трансформувався в потужний дерновий ґрунт.

Ґрунт у розчистці № 2 – темно-сірий або буровато-сірий (за забарвленням), легкосуглинистий, близький до дерново-підзолистого. Його природні ознаки частково маскуються внесенням добрив, сформований на піщано-пидуватих легких суглинках. Чітко проявляються ознаки дернового процесу і частково опідзолення, розвинений на карбонатній породі, первинно розвивався як дерново-карбонатний.

Висновки

Ґрунти поселення (розчистка № 1) і фоновий (розчистка № 2) дещо різняться. Довгострокове освоєння ґрунтів людиною в межах давнього поселення призвело до їх трансформації з лісових на дернові, дерново-підзолисті. Ймовірно, і під час існування давньоруського поселення (X–XIII ст.) проходило окультурювання ґрунту і тут панували відкриті простори з дерновими і дерново-підзолистими ґрунтами. Територія розорювалася. Навіть формування на морені відбулося лише утворенням оглеєного горизонту над мореною як матеріалом важчого гранулометричного складу і саме в нижній частині профілю над мореною проявляються ознаки оглеєння і формування ілювію (коломорфні глини).

Окарбоначеність матеріалу породи у фоновому ґрунті (близьке залягання вапняків) у ранньому ґрунтоутворенні замаскувало прояв ознак підзолоутворення і сформувався опідзолений, близький до дернових – дерново-карбонатний фоновий ґрунт на карбонатних суглинках. Це

поліпшило агрономічні властивості ґрунту і в подальшому пригнітило процеси підзолоутворення, риси яких все ж збереглися деякою мірою (напливи коломорфних глин, озалізнення, побуріння маси з характерною для ілювію структурою). Однак, карбонатність породи у фоновому ґрунті призвела до формування шару кремнисто-карбонатних конкрецій. На підвищених ділянках поселення у зв'язку з окультуренням формувалися як дерново-слабопідзолисті, так і дернові ґрунти з ознаками розвитку елювіально-ілювіальних процесів в ранню стадію розвитку (лісовий ґрунт на морені). Під час існування поселення у зв'язку з окультуренням і внесенням добрив, а також нарощуванням профілю матеріалом легшого гранулометричного складу посилилися дернові процеси з накопиченням гумусу на виходах карбонатних суглинків на ранніх стадіях формування дерново-карбонатні ґрунти. Порівнюючи фоновий ґрунт з ґрунтом поселення нами встановлено, що в (X–XIII ст.) на території панували в основному дернові опідзолені або дерново-підзолисті ґрунти (гумусово-перехідні горизонти), хоча на цій території також існували і ділянки лісів помірної зони (Полісся). Давні ґрунти цього часу – з більшою кількістю кротовин та червоточин і, ймовірно, в (X–XIII ст.) природні зони були зміщені на північ (дещо аридніші умови при достатньому і навіть надлишковому зволоженні з ознаками оглеєння). Легкосуглинкові ґрунти були придатні і легші для обробки, не відрізнялися надмірною родючістю без окультурення і внесення добрив і частіше використовувалися як пасовища.

Список використаної літератури

- Веклич М.Ф. Історія та прогноз розвитку природи і довкілля: теоретичні засади. *Український географічний журнал*. 2001. № 3. С. 45–51.
- Дорошкевич С.П. Природа Середнього Побужжя у плейстоцені за даними вивчення викопних ґрунтів. Київ : Наукова думка, 2018. 172 с.
- Кармазиненко С.П. Мікроморфологічні дослідження викопних і сучасних ґрунтів України. Київ : Наукова думка, 2010. 120 с.
- Кушнір А.С., Лейберюк О.М. База даних палеоґрунтознавчих досліджень голоцену в межах рівнинної частини України на основі ПІС-технологій. *Український географічний журнал*. 2022. № 1. С. 47–52. <https://doi.org/10.15407/ugz2022.01.047>.
- Матвіїшина Ж.М. Основні напрями палеогеографічних досліджень Інституту географії НАН України. *Український географічний журнал*. 2023. № 1 (121). С. 7–14. <https://doi.org/10.15407/ugz2023.01.007>.
- Матвіїшина Ж.М., Кармазиненко С.П., Дорошкевич С.П., Мацібора О.В., Кушнір А.С., Передерій В.І. Палеогеографічні передумови та чинники змін умов проживання людини на території України у плейстоцені та голоцені. *Український географічний журнал*. 2017. № 1. С. 19–29. <https://doi.org/10.15407/ugz2017.01.019>.

Матвіїшина Ж.М., Пархоменко О.Г. Дослідження голоценових ґрунтів багатошарового поселення Мала Глумча-1 території Житомирського Полісся. *Виклики, загрози та розвиток у галузі біології, сільського господарства, екології, географії, геології та хімії*: збірник наукових праць. Люблін. Республіка Польща. 2021. С. 148–154.

Матвіїшина Ж.М., Пархоменко О.Г. Дослідження ґрунтового покриву ландшафтної області Київського Полісся в межах давнього поселення Торчин-1 на Житомирщині. *Modern directions of scientific research development: collection of materials The 1st International scientific and practical conference* VoScience Publisher. Chicago. USA. 2021. P. 346–356.

Матвіїшина Ж.М., Пархоменко О.Г. Зміни ґрунтів і ландшафтів за даними комплексних досліджень багатошарового кургану неподалік с. Бурти на Черкащині. *Наукові записки СумДПУ імені А.С.Макаренка. Географічні науки*. 2019. № 10. С. 25–46.

Матвіїшина Ж.М., Пархоменко О.Г. Реконструкція природних ландшафтів з використанням мікроморфологічного методу дослідження ґрунтів давнього поселення біля с. Лутівка Житомирського Полісся. *Challenges in science of nowadays: collection of materials X International Scientific and Practical Conference*. Washington. USA. 2022. P. 335–345.

Степанчук В.М., Матвіїшина Ж.М., Рижов С.М., Кармазиненко С.П. Давня людина: палеогеографія та археологія. Київ : Наукова думка, 2013. 208 с.

Яцишин А.М., Дмитрук Р.Я., Богуцький А.Б. Методи дослідження четвертинних відкладів: навчально-методичний посібник. Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2009. 177 с.

Gavryliuk N.O., Sirenko O.A., Matviishyna Zh.M., Matera M. Paleoeological characterisation of Konsulivska Hillfort and ITS Environment. *Археологія*. 2023. № 4. С. 21–35. <https://doi.org/10.15407/arheologia>.

Gerasimenko N. Climatic and environmental oscillations in southeastern Ukraine from 30 to 10 ka, inferred from pollen and lithopedology. *Geology and Geoarchaeology of the Black Sea Region: Beyond the Flood Hypothesis*. 2011. P. 117–132.

Hildebrandt-Radke I., Makarowicz P., Matviishyna Z.N., Parhomenko A., Lysenko S.D., Kochkin I.T. Late Neolithic and Middle Bronze Age barrows in Bukivna, Western Ukraine as a source to understand soil evolution and its environmental significance / *Journal of Archaeological Science*. 2019. № 27. P. 1–11.

Kiosak D., Matviishyna Z. The Soils of Early Farmers and Their Neighbors in the Southern Buh Catchment (Ukraine): Micromorphology and Archaeological Context. *Land*. 2023. № 12 (2). P. 388. <https://doi.org/10.3390/land12020388>.

Matviishyna Zh., Kushnir A. Climatic and landscape influences on the distribution and abundance of the Pleistocene small-mammal burrows of Ukraine. *Historical Biology*. 2021. № 33 (1). P. 97–108. <https://doi.org/10.1080/08912963.2019.1666837>.

Matviishyna Zh.M., Doroshkevych S.P., Kushnir A.S. Assessment of influence of paleogeographical conditions on the formation of mineral raw materials for the manufacture of ceramic products (on the example of Opishnyanske deposit of clay rocks). *Ukrainian geographical journal*. 2021. № 1 (113). P. 15–24. <https://doi.org/10.15407/ugz2021.01.015>.

References (translated & transliterated)

Veclich, M.F. (2001). Istorія ta prognoz rozvytku pryrody i dovkillya: teoretychni zasady [History and forecast of the development of nature and environment: theoretical foundation]. *Ukrayinskiy Geografichniy zhurnal [Ukrainian Geographical Journal]*, 3, 45–51 [in Ukrainian].

Doroshkevich, S.P. (2018). Pryroda Serednjogo Pobuzhzhia u Pleystoceni za danymy vyvchennia vukopnykh gruntiv [The nature of the Middle Pobuzhha in the Pleistocene according to the study of the study of fossil soils]. Kyiv : Naukova dumka [in Ukrainian].

Karmazynenko, S.P. (2010). Mikromorfologichni doslidzhennia vykopnykh i suchasnykh gruntiv Ukrainy [Micromorphological fossil and modern soils of Ukraine]. Kyiv : Naukova dumka [in Ukrainian].

Kushnir, A.S., & Leiberyuk, O.M. (2022). Baza dannykh paleogruntoznavchykh doslidzhen gholocenu v mezhakh rivnynnoii chastyny Ukrainy na osnovi GIS technolohiy [Database of Holocene paleochronological studies within the plains of Ukraine based on GIS technologies]. *Ukrayinskiy Geografichniy zhurnal [Ukrainian Geographical Journal]*, 1, 47–52. <https://doi.org/10.15407/ugz2022.01.047> [in Ukrainian].

Matviishyna, Zh.M. (2023). Osnovny napriamy paleogeographichnykh doslidzhen Institutu Geographii NAN Ukrainy [The main directions of paleogeographic research of the Institute of

Geography of the National Academy of Science of Ukraine]. *Ukrayinskiy Geografichniy zhurnal [Ukrainian Geographical Journal]*, 1 (121), 7–14 [in Ukrainian].

Matviishyna, Zh.M., Karmazynenko, S.P., Doroshkevich S.P., Matsibora, O.V., Kushnir, A.S., & Perederii, V.I. (2017). Paleogeografichni peredumovu ta chinnuky zmin umov prozhivannia liudyny na terytorii Ukrainie u Pleistotseni ta gholotseni [Paleogeographic prerequisites and factors of human habitation conditions in the territory of Ukraine in the Pleistocene and Holocene]. *Ukrayinskiy Geografichniy zhurnal [Ukrainian Geographical Journal]*, 1, 19–29. <https://doi.org/10.15407/ugz2017.01.019> [in Ukrainian].

Matviishyna, Zh.M., & Parkhomenko, O.G. (2021). Doslidzhennia gholotsenovykh gruntiv bagatosharovogo poselennia Mala Glumcha-1 terytorii Zhytomirskogo Polissia [Research of the multilayered settlement of Glumcha-1 of the territory of Zhytomyr Polissia]. *Vyklyky, zagrozy ta rozvytok u galuzy biologiyi, silskogo gospodarstva, ekologii, geologii ta khimii [Challenges, threats and development in the field of biology, agriculture, ecology, geography, geology and chemistry]*. Lublin. Republika Polsha, pp. 148–154 [in Polish].

Matviishyna, Zh.M., & Parkhomenko, O.G. (2021). Doslidzhennia gruntovogo pokryvu landshaftnoi oblasti Kyivskogo Polissia v mezhah davnjogo poselennia Torchyn-1 na Zhytomyrshchynu [Study of the soil cover of the landscape region Kyiv Polissia within the ancient settlement of Torchyn-1 on Zhytomyrshchyna]. *Modern directions of scientific research development. The 1st International scientific and practical conference BoScience Publisher*. Chicago. USA., pp. 346–356 [in English].

Matviishyna, Zh.M., & Parkhomenko, O.G. (2019). Zminy gruntiv i landshaftiv za danymy kompleksnykh doslidzen bagatosharovogo kurgany nepodalik c. Burty na Cherkashchyni [Soil and landscape changing according to complex studies of multi-lower mound near the village of Burty in the Cherkasy region]. *Naukovi zapusky SumD.P.U. imeni A.C. Makarenka. Geografichni nauky [Scientific notes of Sum D.P.U. of A.S. Makarenko. Geographical sciences]*, 10, 25–46 [in Ukrainian].

Matviishyna, Zh.M., & Parkhomenko, O.G. (2022). Rekonstruktsiya pryrodnih landshaftiv z vykorystanniam mikromorfologichnogo doslidzhennia gruntiv davniogo poselennia bilia sela Lutivka Zhytomirskogo Polissia [Reconstruction of natural landscape using micromorphological method research of the soils of an ancient settlement near the village Lutivka of Zhytomyr Polissia]. *Challenges in science of nowadays. X International Scientific and Practical Conference*. Washington. USA., pp. 335–345 [in English].

Stepanchuk, V.M., & Matviishyna, Zh.M. (2013). Davnia lyudyna: paleogeografiya ta arkeologiya [Ancient man: paleogeography and archeology]. Kyiv : Naukova dumka [in Ukrainian].

Yatsyshyn, A.M., & Dmytruk, R.Y. (2009). Metody doslidzhennia chetvertynnykh vidkladiv: navchalno-metodychniy posibnyk [Quaternary sediment research methods: educational and methodological manual]. L'viv : Vidavnychiy tsentr L.N.U. imeni Ivana Franka [in Ukrainian].

Gavryliuk, N.O., & Sirenko, O.A. (2023). Paleoecological characterisation of Konsulivska Hillfort and ITS Environment. *Archaeology*, 4, 21–35. <https://doi.org/10.15407/arheologia> [in Ukrainian].

Gerasimenko, N. (2011). Climatic and environmental oscillations in southeastern Ukraine from 30 to 10 ka, inferred from pollen and lithopedology. *Geology and Geoarchaeology of the Black Sea Region: Beyond the Flood Hypothesis*, 117–132 [in English].

Hildebrandt-Radke, I., Makarowicz, P., Matviishyna, Z.N., Parhomenko, A., Lysenko, S.D., & Kochkin, I.T. (2019). Late Neolithic and Middle Bronze Age barrows in Bukivna, Western Ukraine as a source to understand soil evolution and its environmental significance. *Journal of Archaeological Science*, 27, 1–11 [in English].

Kiosak, D., & Matviishyna, Z. (2023). The Soils of Early Farmers and Their Neighbors in the Southern Buh Catchment (Ukraine): Micromorphology and Archaeological Context. *Land*, 12 (2), 388. <https://doi.org/10.3390/land12020388> [in English].

Matviishyna, Zh., & Kushnir, A. (2021). Climatic and landscape influences on the distribution and abundance of the Pleistocene small-mammal burrows of Ukraine. *Historical Biology*, 33 (1), 97–108. <https://doi.org/10.1080/08912963.2019.1666837> [in English].

Matviishyna, Zh.M., & Doroshkevych, S.P. (2021). Assessment of influence of paleogeographical conditions on the formation of mineral raw materials for the manufacture of ceramic products (on the example of Opishnyanske deposit of clay rocks). *Ukrainian geographical journal*, 1 (113), 15–24. <https://doi.org/10.15407/ugz2021.01.015> [in English].

Отримано: 10.04.2024

Прийнято: 23.04.2024



УДК 631.4:528.9

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.12>

КАРТОГРАФІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВМІСТУ КАЛІЮ У ҐРУНТАХ ЗДОЛБУНІВЩИНИ РІВНЕНСЬКОЇ ОБЛАСТІ

С. М. Остапчук¹, О. П. Остапчук², Н. В. Кушнірук³

Вміст калію належить до основних агрохімічних властивостей ґрунту, що мають вагомий вплив на якість та врожайність сільськогосподарських культур. Метою дослідження є картографічне моделювання вмісту калію в ґрунтах одного з найбільших за площею і розвинутих у сільськогосподарському відношенні регіонів Рівненської області – Здолбунівщині. За результатами трьох останніх турів планової агрохімічної паспортизації сільськогосподарських земель, проведеної Рівненською філією ДУ «Держґрунтохорона», створено базу даних, за допомогою спеціального програмного забезпечення ArcMap укладено тематичні карти станом на 2007, 2012, 2017 рр., побудовано відповідні діаграми динаміки середньозважених показників вмісту калію в ґрунті.

Встановлено, що середньозважені показники вмісту калію протягом усього періоду на обстеженій території знаходилися у межах від 55 мг/кг до 159 мг/кг ґрунту, тобто їх числові значення згідно якісної класифікації відповідали низькому, середньому та підвищеному рівням. Виявлені території Будеразької, Богдашівської, Південської і Дерманської Першої сільських рад, де місткість калію в ґрунті не є оптимальною. Наведені рекомендації щодо виправлення ситуації на цих територіях. Створені моделі допомагають виявляти просторово-часові особливості розподілу цього важливого макроелемента і при залученні інших додаткових матеріалів приймати виважені рішення щодо агрохімічних землевпорядних заходів як у розрізі колишніх сільських рад, так й окремих агроформувань чи полів.

Ключові слова: тематичні карти, картограми, діаграми, ґрунти, вміст калію, Здолбунівщина.

¹ кандидат технічних наук,
доцент кафедри геодезії та картографії
(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)
e-mail: s.m.ostapchuk@nuwm.edu.ua
ORCID: 0000-0002-4493-1144

² кандидат технічних наук,
доцент кафедри комп'ютерних наук та прикладної математики
(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)
e-mail: o.p.ostapchuk@nuwm.edu.ua
ORCID: 0000-0003-0543-2884

³ бакалавр спеціальності «Геодезія та землеустрій»
(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)
e-mail: kushniruk_az19@nuwm.edu.ua
ORCID: 0009-0009-7715-6445

CARTOGRAPHIC MODELING OF POTASSIUM CONTENT IN THE SOILS OF ZDOLBUNIV DISTRICT OF RIVNE REGION

S. M. Ostapchuk, O. P. Ostapchuk, N. V. Kushniruk

Potassium content is one of the main agrochemical properties of soil that has a significant impact on the quality and yield of crops. The aim of the study is to map the potassium content of soils in Zdolbuniv district, one of the largest and most agriculturally developed regions of Rivne oblast. Based on the results of the last three rounds of scheduled agrochemical certification of agricultural land conducted by the Rivne branch of the State Soil Conservation Service, a database was created, thematic maps were drawn up using ArcMap software as of 2007, 2012, and 2017, and corresponding diagrams of the dynamics of weighted average potassium content in soil were constructed.

It was established that the weighted average potassium content throughout the entire period in the surveyed area ranged from 55 mg/kg to 159 mg/kg of soil, i.e. their numerical values according to the qualitative classification corresponded to low, medium and high levels. The territories of Buderazh, Bohdashivka, Piucha and Dermanske First Village Councils were identified where the potassium capacity in the soil is not optimal. Recommendations for improving the situation in these areas are given. The created models help to identify the spatial and temporal features of the distribution of this important macroelement and, with the involvement of other additional materials, to make informed decisions on agrochemical land management measures both in the context of former village councils and individual agricultural formations or fields.

Key words: thematic maps, cartograms, diagrams, soils, potassium content, Zdolbuniv district.

Вступ

Важливою умовою для вирішення завдань ефективного використання сільськогосподарських земель, підвищення їх продуктивності, забезпечення екологічно-збалансованої культури землеробства є проведення систематичних агрохімічних обстежень ґрунтового покриву. Визначені агрохімічні параметри дають змогу оцінити стан родючості ґрунту та розробити необхідні агрозаходи щодо його захисту від можливих деградаційних процесів (Стратегія ... , 2012; Методика ... , 2018; Мірошниченко та ін., 2021; Запасний та ін., 2022; Крупко та ін., 2023).

Складовою частиною основних агрохімічних показників ґрунту для здорового росту та розвитку рослин є вміст одного з трьох макроелементів – калію, значення якого можна коротко подати наступним чином:

- регулює водно-сольовий баланс. Покращує зберігання води та концентрацію іонів в клітинах рослин;
- сприяє виробництву і транспортуванню цукрів, білків та інших фітохімікатів у рослинах;
- поліпшує стійкість рослин до стресових умов. Допомогає зберігати гідро-термічний баланс, забезпечує підтримку метаболізму, зменшує ураження рослин хворобами, шкідниками та абіотичними факторами стресу;
- збільшує розмір та вагу плодів. Підвищує роздування та силу стінок клітин, що сприяє розвитку плодів.

Недостатній, як і надмірний вміст калію (стосується, насамперед, дисбалансу у засвоєнні поживних речовин), негативно позначається на врожайності сільськогосподарської продукції (Господаренко та ін., 2013; Пасічняк та ін., 2018; Василенко та ін., 2022; Балюк та ін., 2023; Іваніна і Табачук, 2023). При низьких показниках вмісту калію рослини втрачають природний напружений стан і починають в'янути, в них гальмується синтез білка, порушується азотний обмін, проявляються ознаки захворювань (погане куціння, бронзовий наліт, побуріння країв, скручування листя, поява гнилі, вимерзання та ін.). При надмірному калійному живленні відбувається гальмування у розвитку рослин, що проявляється, наприклад, у появі блідих чи бурих плям, опаданні листя, погіршенні смаку плодів. І у першому, і у другому випадках це призводить до зниження якості та зменшення обсягу продукції, тому є однаковою мірою небажаним. З огляду на вище, калійне живлення має бути оптимальним, а калій називають «елементом якості». Найбільш чутливу увагу до нестачі калію виявляють картопля, капуста, цукровий та кормовий буряк, томати, кукурудза, соняшник, ріпак, фруктові дерева. Найменша ж залежність спостерігається у гречки, пшениці, ячменю, жита, льону, бобів, трав.

При вивченні агрохімічних параметрів ґрунтів, в тому числі й наявності калію, одним із релевантних і доцільних інструментів вважається картографічне моделю-

вання. Такий підхід оснований на створенні тематичних карт, які за даними агрохімічних обстежень наочно демонструють розподіл відповідних показників на заданій території. Про актуальність і перспективність подібних розвідок свідчать публікації багатьох авторів (Фатеев і Морозов, 2012; Ковальчук і Рожко, 2016; Ромащенко та ін., 2022; Остапчук і Кушнірук, 2023).

Мета цього дослідження: оцінка динаміки вмісту калію в ґрунтовому покриві Здолбунівщини Рівненської області із застосуванням картографічного моделювання. Побудовані тематичні моделі допомагають встановлювати просторові закономірності розподілу цього важливого макроелемента та приймати відповідні управлінські рішення при плануванні агрохімічних аспектів землекористування.

Матеріал і методи

Вихідними даними для досліджень стали результати трьох останніх планових агрохімічних обстежень сільськогосподарських угідь, які виконувала Рівненська філія ДУ «Держґрунтохорона» (IX–XI тури паспортизації земель, 2007–2017 рр.) (Науковий ... , 2007, 2012, 2017 рр.). Такого роду моніторинг передбачено проводити кожні 5 років, але у 2022 р. він не здійснювався через російсько-українську війну. Подальша його перспектива, принаймні на найближчий час, залишається під питанням.

Отримані результати обстежень було систематизовано, введено у створену базу даних та використано для побудови тематичних карт за допомогою спеціального програмного забезпечення ArcMap. За основний спосіб картографічного зображення обрано кольорові картограми. За відсутності даних картограми мають білий колір. Для зручності використання карти побудовано у лінійному масштабі.

Територія Здолбунівщини (мається на увазі існуючий до адміністративно-територіальної реформи 2020 р. колишній Здолбунівський район) вибрана для досліджень не випадково, адже це один із найбільших за площею і розвинутих у сільськогосподарському відношенні регіонів Рівненської області. До його складу належать 3 новоутворені територіальні громади – Здовбицька (об'єднання Здовбицької, Миротинської, Уїздецької, Урвенської сільських рад), Здолбунівська (об'єднання Здолбунівської міської, Богдашівської, Глинської, Копитківської, Новосіклівської, П'ятигірської сільських

рад), Мізоцька (об'єднання Мізоцької селищної, Білашівської, Будеразької, Бушанської, Дерманської Першої, Дерманської Другої, Малоощаницької, Новоощаницької, Староощаницької, Півченської, Спасівської, Ступнівської сільських рад).

Характерною ознакою регіону є велика різноманітність ґрунтового покриву. Серед обстежених ґрунтів найбільші площі належать світло-сірим опідзоленим слабокам'янистим (16,8%), темно-сірим опідзоленим (13,8%), світло-сірим і сірим опідзоленим середньозмитим (11,7%) та сірим опідзоленим слабозмитим (10,3%). Вони мають різні агрохімічні характеристики, які є визначальними для родючості.

Результати та обговорення

У ході IX туру агрохімічної паспортизації земель щодо вмісту калію виявлено, що переважну площу займають ґрунти з середнім його вмістом – 16 768,0 га (71,5% від обстежених), меншу з низьким його вмістом – 5 382,3 га (22,9% від обстежених), ще меншу з підвищеним – 1 320,1 га (5,6% від обстежених), що засвідчено на рис. 1.

Середньозважені показники вмісту калію в ґрунті в розрізі сільських рад варіюють від 55 мг/кг (Спасівська) до 130 мг/кг (Бушанська, Дерманська Перша). У Здолбунівській міській, Ступнівській і Урвенській сільських радах такі обстеження не проводилися.

X тур агрохімічної паспортизації дав змогу отримати наступні параметри: ґрунти з середнім вмістом калію займають площу 10 799,5 га (48,9% від обстежених), з низьким – 7 288,6 га (33,0% від обстежених), з підвищеним – 3 992,0 га (18,1% від обстежених).

Середньозважені ж показники вмісту калію в ґрунті у розрізі сільських рад (рис. 2) змінюються від 73 мг/кг (Богдашівська) до 131 мг/кг (Півченська). На території Здолбунівської міської ради обстеження не виконувалися.

XI тур агрохімічного моніторингу дав змогу отримати наступні відомості: ґрунти з середнім вмістом калію займають площу 6 318,0 га (73,9% від обстежених), з підвищеним – 2 065,5 га (24,1% від обстежених), з низьким – 168,0 га (2,0% від обстежених).

Середньозважені показники вмісту калію в ґрунті у розрізі сільських рад (рис. 3) мають значення від 61 мг/кг (Будеразька) до 159 мг/кг (Півченська). У цьому турі Здолбунівська міська, Бушанська, Дерманська Перша, Дерманська Друга,

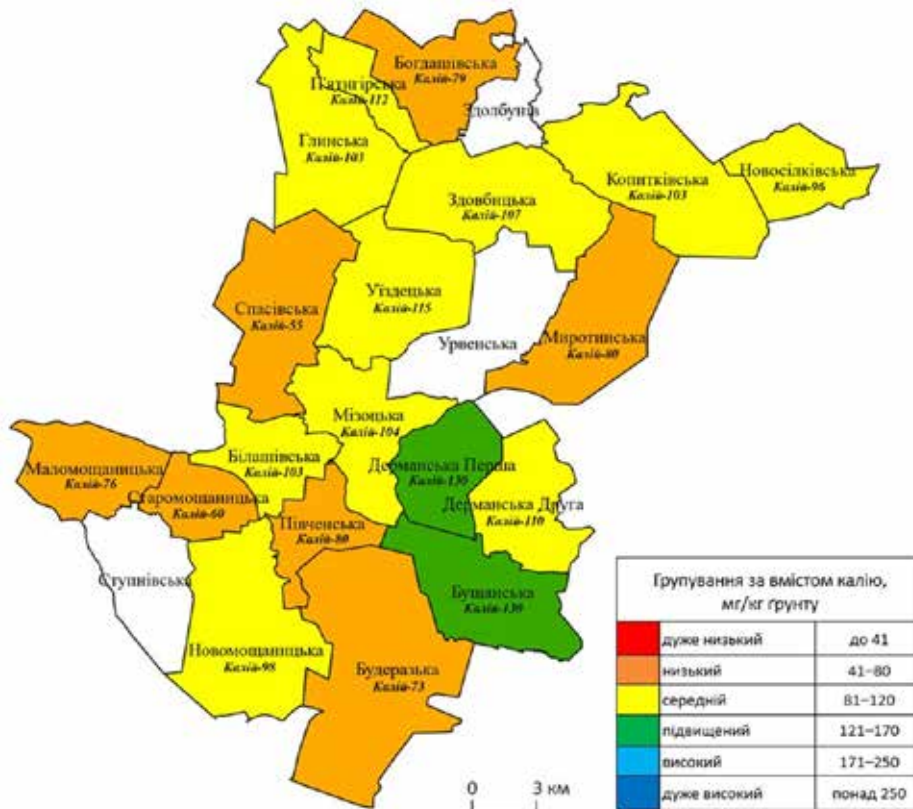


Рис. 1. Середньозважені показники вмісту калію в ґрунті, 2007 р. (укладено авторами за джерелом (Науковий ... , 2007)

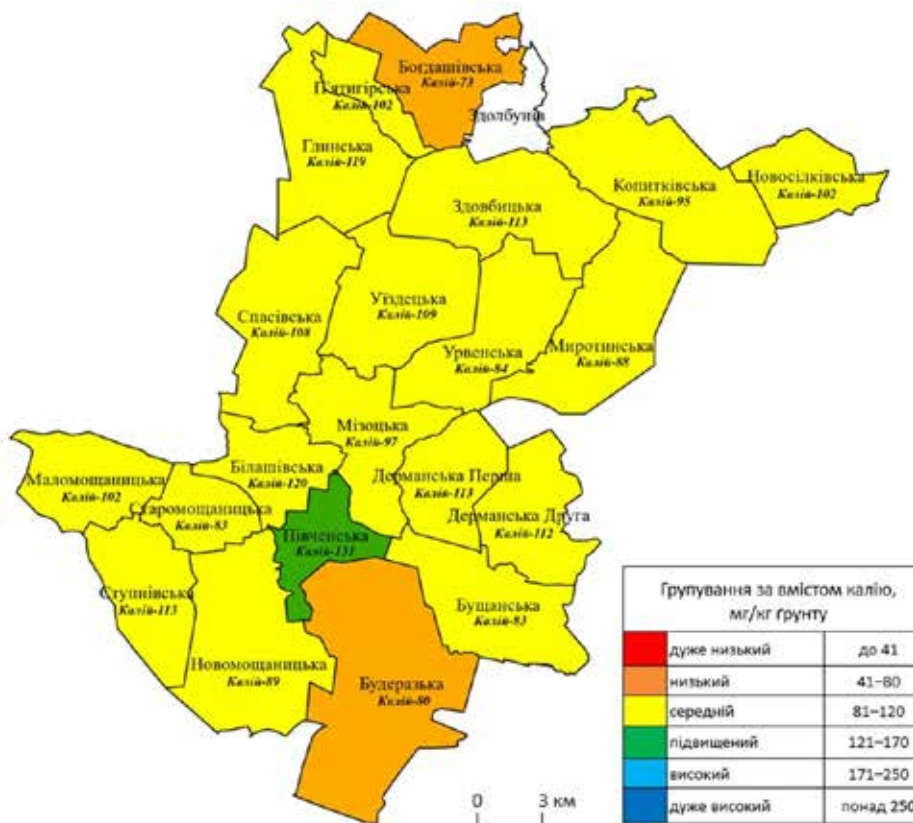


Рис. 2. Середньозважені показники вмісту калію в ґрунті, 2012 р. (укладено авторами за джерелом (Науковий ... , 2012)

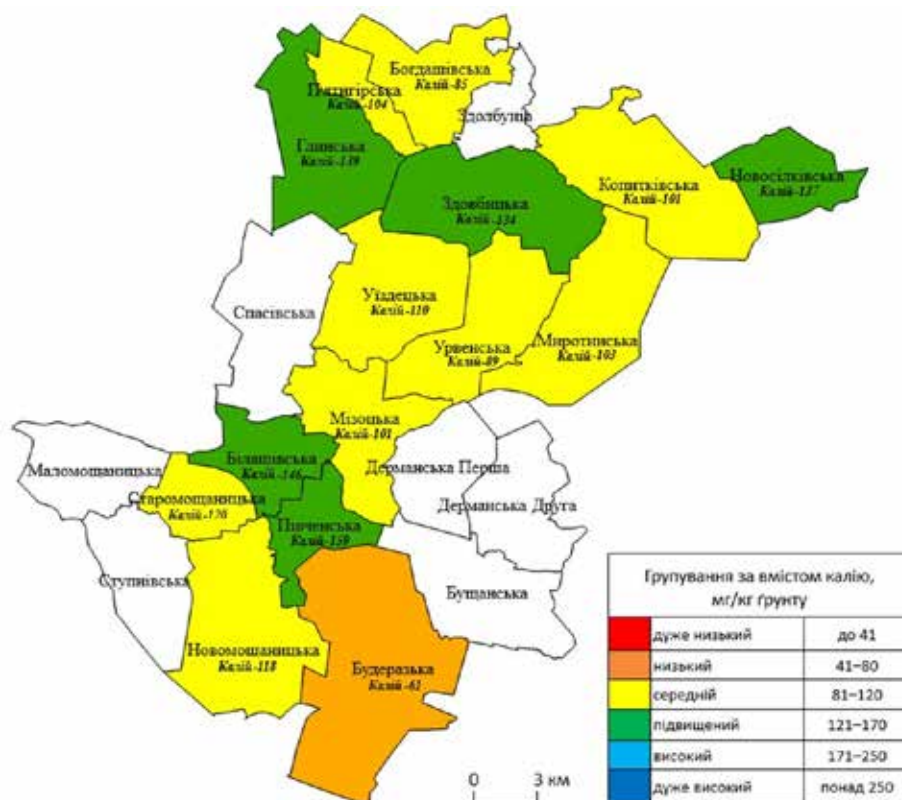


Рис. 3. Середньозважені показники вмісту калію в ґрунті, 2017 р. (укладено авторами за джерелом (Науковий ... , 2017)

Маломощаницька, Спасівська і Ступнівська сільські ради обстеженнями не були охоплені.

Укладені тематичні карти за допомогою кольорових картограм показують просторовий розподіл вмісту калію в ґрунті у розрізі колишніх сільських рад. Таке подання дає можливість встановити території з низьким, середнім та підвищеним вмістом калію, тим самим визначивши їх належність до проблемних чи потенційно родючих земель. На картограмах зазначені й конкретні кількісні значення середньозважених показників вмісту калію в ґрунтового покриві, що дозволяє прослідкувати відповідні зміни впродовж трьох останніх турів агрохімічної паспортизації.

Загальний характер динаміки середньозважених показників вмісту калію в ґрунті на обстеженій території за допомогою діаграм показано на рис. 4. Протягом зазначеного періоду часу для усєї території Золобунівщини такий узагальнений показник відповідає середньому вмісту калію (згідно діючого класифікаційного поділу – 81–120 мг/кг). Причому, у 2017 р. спостерігається його незначне зростання –

до 109 мг/кг порівняно з 100 мг/кг 2007 і 2012 рр.

Висновки

За результатами трьох останніх турів планової агрохімічної паспортизації сільськогосподарських земель (2007–2017 рр.) виконано картографічне моделювання вмісту калію в ґрунті на території Золобунівщини Рівненської області. При побудові тематичних карт використано спеціальне програмне забезпечення ArcMap. Основний спосіб зображення – картограми, масштаб – лінійний.

Проведений аналіз показав, що впродовж зазначеного періоду у розрізі колишніх сільських рад середньозважені показники вмісту калію варіюють у межах від 55 мг/кг до 159 мг/кг ґрунту, тобто їх числові значення відповідають низькому, середньому та підвищеному рівням. У цьому плані найбільше занепокоєння викликає стан ґрунтів у Будеразькій і Богдашівській (найнижчі показники) та Південській і Дерманській Першій сільських радах (найвищі показники). Як уже зазначалося, це однаковою мірою небажане. У першому випадку рекомендується застосування калійних добрив,



Рис. 4. Динаміка середньозважених показників вмісту калію в ґрунті (укладено авторами за джерелами (Науковий ... , 2007, 2012, 2017)

використання соломи і стебеління, обмежене живлення амонійним азотом, вирощування невибагливих до калію рослин. У другому – застосування калійних добрив уже втрачає нагальну актуальність, натомість можна рекомендувати вирощування рослин, які споживають багато калію. Тобто, в обох випадках потрібно однаково пильну увагу звернути на раціональну структуру сівозмін.

Наведені діаграми показують загальну динаміку середньозважених показни-

ків вмісту калію на обстеженій території і засвідчують тенденцію до зміщення від середнього рівня в сторону підвищеного.

Тематичні карти та діаграми при сумісному використанні з іншими додатковими даними є важливими матеріалами для прийняття управлінських рішень щодо оптимального вмісту калію в ґрунтах як на території нещодавно утворених громад у розрізі колишніх сільських рад, так і у межах окремих агроформувань чи полів.

Список використаної літератури

- Балюк С.А., Воротинцева Л.І., Соловей В.Б., Шимель В.В. Реалії українського чорнозему: сучасний стан, еволюція, охорона та стале управління. *Вісник аграрної науки*. 2023. № 3 (840). С. 5–13. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202303-01>.
- Василенко А.М., Мелешко Ю.В., Дмитренко О.В., Романенко В.М. Агрохімічна характеристика та стан родючості ґрунтів Черкаської області. *Охорона ґрунтів*. 2022. Вип. 12. С. 64–71.
- Господаренко Г.М., Нікітіна О.В., Кривда Ю.І. Уміст і запаси рухомих сполук калію в ґрунті після тривалого застосування добрив у польовій сівозміні. *Вісник Сумського національного аграрного університету: Агрономія і біологія*. 2013. Вип. 11 (26). С. 51–55.
- Запасний В.С., Гелескул О.І., Коваль Н.М., Мовчан Н.Ю., Гриценко О.В. Деградація ґрунтів у сільському господарстві. *Охорона ґрунтів*. 2022. Вип. 12. С. 7–12.
- Іваніна В.В., Табачук О.О. Формування балансу елементів живлення в посівах цукрових буряків залежно від удобрення і структури сівозмін. *Вісник аграрної науки*. 2023. № 10 (847). С. 13–18. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202310-02>.
- Ковальчук І.П., Рожко О.В. Атласне картографування ґрунтів і земельних ресурсів у зарубіжних країнах. *Наукові записки ТНПУ ім. Володимира Гнатюка: Географія*. 2016. № 2. С. 202–213.
- Крупко Г.Д., Лисиця А.В., Толочик І.А., Портухай О.І. Моніторинг агроекологічного стану ґрунтів окремих територіальних громад Волинського Полісся. *Український журнал природничих наук*. 2023. № 4. С. 104–114. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.4.2023.12>.

Методика проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення: керівний нормативний документ / за ред. І.П. Яцука, С.А. Балюка. Київ, 2018. 108 с.

Мірошниченко М.М., Христенко А.О., Гладкіх Є.Ю. 50-річна динаміка вмісту рухомих сполук азоту, фосфору і калію в чорноземі опідзоленому за даними стаціонарного польового дослідження. *Вісник аграрної науки*. 2021. № 8 (821). С. 5–14. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202108-01>.

Науковий звіт Рівненської філії ДУ «Держґрунтохорона» за 2007 р. (Неопубл.)

Науковий звіт Рівненської філії ДУ «Держґрунтохорона» за 2012 р. (Неопубл.)

Науковий звіт Рівненської філії ДУ «Держґрунтохорона» за 2017 р. (Неопубл.)

Остапчук С.М., Кушнірук Н.В. Картографічне моделювання динаміки вмісту гумусу в ґрунтах Здолбунівщини Рівненської області. *Науковий вісник Чернівецького університету: Географія*. 2023. Вип. 845. С. 110–119. <https://doi.org/10.31861/geo.2023.845.110-119>.

Пасічняк В.І., Наконечний А.П., Склонний С.О., Глімбоцька Т.Л. Забезпеченість основними елементами живлення ґрунтів Вінниччини та їхня вартість. *Охорона ґрунтів*. 2018. Вип. 7. С. 13–17.

Ромащенко М.І., Балюк С.А., Тараріко Ю.О., Лісовий В.М. Розроблення та впровадження системи інформаційного забезпечення землеробства. *Вісник аграрної науки*. 2022. № 9 (834). С. 5–13. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202209-01/>.

Стратегія збалансованого використання, відтворення і управління ґрунтовими ресурсами України / за ред. С.А. Балюка, В.В. Медведєва. Київ: Аграрна наука, 2012. 239 с.

Фатєєв А.І., Морозов О.В. Картографи забезпеченості мікроелементами ґрунтів Херсонської області: методичні рекомендації. Херсон: Грінь Д.С., 2012. 34 с.

References (translated & transliterated)

Baliuk, S.A., Vorotyntseva, L.I., Solovei, V.B., & Shymel, V.V. (2023). Realii ukrainskoho chornozemu: suchasnyi stan, evoliutsiia, okhorona ta stale upravlinnia [Realities of Ukrainian black soil: current state, evolution, protection and sustainable management]. *Visnyk ahrarnoi nauky [Bulletin of Agrarian Science]*, 3 (840), 5–13. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202303-01> [in Ukrainian].

Vasylenko, A.M., Meleshko, Yu.V., Dmytrenko, O.V., & Romanenko, V.M. (2022). Ahrokhimichna kharakterystyka ta stan rodiuchosti gruntiv Cherkaskoi oblasti [Agrochemical characteristics and soil fertility in the Cherkasy region]. *Okhorona gruntiv [Soil protection]*, 12, 64–71 [in Ukrainian].

Hospodarenko, H.M., Nikitina, O.V., & Kryvda, Yu.I. (2013). Umist i zapasy rukhomykh spoluk kaliuu v grunti pislia tryvaloho zastosuvannia dobriv u polovii sivozmini [The content and reserves of mobile potassium compounds in the soil after long-term use of fertilizers in field crop rotation]. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu: Ahronomiia i biolohiia [Bulletin of Sumy National Agrarian University: Agronomy and Biology]*, 11 (26), 51–55 [in Ukrainian].

Zapasnyi, V.S., Heleskul, O.I., Koval, N.M., Movchan, N.Iu., & Hrytsenko, O.V. (2022). Dehradatsiia gruntiv u silskomu hospodarstvi [Soil degradation in agriculture]. *Okhorona gruntiv [Soil protection]*, 12, 7–12 [in Ukrainian].

Ivanina, V.V., & Tabachuk, O.O. (2023). Formuvannia balansu elementiv zhyvlennia v posivakh tsukrovoykh buriakiv zalezho vid udobrennia i struktury sivozmin [Formation of the balance of nutrients in sugar beet crops depending on fertilization and crop rotation structure]. *Visnyk ahrarnoi nauky [Bulletin of Agrarian Science]*, 10 (847), 13–18. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202310-02> [in Ukrainian].

Kovalchuk, I.P., & Rozhko, O.V. (2016). Atlasne kartohrafuvannia gruntiv i zemelnykh resursiv u zarubizhnykh krainakh [Atlas mapping of soils and land resources in foreign countries]. *Naukovi zapysky TNPU im. Volodymyra Hnatiuka: Heohrafiia [Scientific notes of Volodymyr Hnatiuk TNPU: Geography]*, 2, 202–213 [in Ukrainian].

Krupko, H.D., Lysytsia, A.V., Tolochyk, I.L., & Portukhai, O.I. (2023). Monitorynh ahroekolohichnoho stanu gruntiv okremykh terytorialnykh hromad Volynskoho Polissia [Monitoring of the agroecological state of soils of individual territorial communities of Volyn Polissya]. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychuykh nauk [Ukrainian Journal of Natural Sciences]*, 4, 104–114. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.4.2023.12> [in Ukrainian].

Yatsuk, I.P., & Baliuk, S.A. (2018). Metodyka provedennia ahrokhimichnoi pasportyzatsii zemel silskohospodarskoho pryznachennia: kerivnyi normatyvnyi dokument [Methodology for conducting agrochemical certification of agricultural land: a guiding regulatory document]. Kyiv, 108 [in Ukrainian].

Miroshnychenko, M.M., Khrystenko, A.O., & Hladkikh, Ye.Iu (2021). 50-richna dynamika vmistu rukhomykh spoluk azotu, fosforu i kaliuu v chornozemi opidzolenomu za danymy statsionarnoho polovoho doslidu [50-year dynamics of the content of mobile nitrogen, phosphorus and potassium compounds in podzolized chernozem according to the data of a stationary field experiment]. *Visnyk ahrarnoi nauky [Bulletin of Agrarian Science]*, 8 (821), 5–14. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202108-01> [in Ukrainian].

Naukovyi zvit Rivnenskoï filii DU «Derzhgruntokhorona» za 2007 r. (Neopubl.) [Scientific report of the Rivne branch of the State Soil Conservation Service for 2007 (unpublished)] [in Ukrainian].

Naukovyi zvit Rivnenskoï filii DU «Derzhgruntokhorona» za 2012 r. (Neopubl.) [Scientific report of the Rivne branch of the State Soil Conservation Service for 2012 (unpublished)] [in Ukrainian].

Naukovyi zvit Rivnenskoï filii DU «Derzhgruntokhorona» za 2017 r. (Neopubl.) [Scientific report of the Rivne branch of the State Soil Conservation Service for 2017 (unpublished)] [in Ukrainian].

Ostapchuk, S.M., & Kushniruk, N.V. (2023). Kartografichne modeliuвання dynamiky vmistu humusu v gruntakh Zdolbunivshchyny Rivnenskoï oblasti [Cartographic modeling of humus content dynamics in soils of Zdolbuniv district of Rivne region]. *Naukovyi visnyk Chernivetskoho universytetu: Heohrafiia Scientific [Bulletin of Chernivtsi University: Geography]*, 845, 110–119. <https://doi.org/10.31861/geo.2023.845.110-119> [in Ukrainian].

Pasichniak, V.I., Nakonechnyi, L.P., Sklonnyi, S.O., & Hlimbotska, T.L. (2018). Zabezpechenist osnovnyimi elementamy zhyvlennia gruntiv Vinnychyny ta yikhnia vartist [Availability and cost of basic nutrients for Vinnytsia region soils]. *Okhorona gruntiv [Soil protection]*, 7, 13–17 [in Ukrainian].

Romashchenko, M.I., Baliuk, S.A., Tarariko, Yu.O., & Lisovyi, V.M. (2022). Rozroblennia ta vprovadzhennia systemy informatsiinoho zabezpechennia zemlerobstva [Development and implementation of the information support system for agriculture]. *Visnyk ahrarnoi nauky [Bulletin of Agrarian Science]*, 9 (834), 5–13. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202209-01/> [in Ukrainian].

Baliuk, S.A., & Medvediev, V.V. (2012). Stratehiia zbalansovanoho vykorystannia, vidtvorennia i upravlinnia gruntovymi resursamy Ukrainy [Strategy of balanced use, reproduction and management of soil resources of Ukraine]. Kyiv: Ahrarna nauka, 239 [in Ukrainian].

Fatieiev, A.I., & Morozov, O.V. (2012). Kartoskhemy zabezpechenosti mikroelementamy gruntiv Khersonskoi oblasti: metodychni rekomendatsii [Maps of microelements availability in soils of Kherson region: methodological recommendations]. Kherson: Hrin D.S., 34 [in Ukrainian].

Отримано: 19.03.2024

Прийнято: 26.04.2024



УДК 556.51:556.53(477)“2020/2022”
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.13>

АНАЛІЗ ГІДРОГРАФІЧНОЇ МЕРЕЖІ ТА СУЧАСНОГО ГІДРОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ РІЧКИ СТИР (2020–2022 РР.)

В. Ю. Стельмах¹

В епоху надмірного техногенного впливу на басейни річок та навколишнє середовище, актуальним є вивчення особливостей формування гідрологічного режиму та його змін під дією різноманітних чинників. Антропогенні навантаження призводять до перетворень у структурі гідрографічної мережі річкових басейнів та до зміни морфометричних показників річки та її приток. Метою дослідження стало вивчення структури гідрографічної мережі басейну річки Стир та аналіз сучасного гідрологічного режиму річки Стир за 2020–2022 роки та його вплив на гідрохімічний режим. В статті охарактеризовані гідрографічні особливості та досліджено структуру гідрографічної мережі р. Стир. Результатами дослідження є: визначення гідрографічних показників р. Стир, її основних приток та басейну; аналіз сучасного гідрологічного режиму річки Стир за даними Волинського ЦГМ, зокрема рівневого режиму, середніх, максимальних, мінімальних витрат води за минулі три роки 2020–2022 рр., максимальних та мінімальних модулів стоку; вивчення концентрації головних йонів та мінералізації води, середніх багаторічних концентрацій загального заліза, біогенних речовин. Наукова новизна полягає у проведенні порядкової класифікації потоків басейну Стира за різними методами (Гравеліуса та Хортон), вивченні гідрологічного режиму та гідрохімічних показників річки Стир за 2020–2022 роки, встановленні кореляційної залежності середньомісячних витрат води від рівнів води на гідрологічних постах, що дозволяє прогнозувати витрати води на річці Стир. Практична значущість дослідження передбачає можливість використання його результатів для прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо використання та охорони водних ресурсів басейну.

Ключові слова: басейн річки, річкова система, гідрографічна мережа, гідрологічний режим, гідрохімічний режим, порядкова класифікація потоків.

ANALYSIS OF THE HYDROGRAPHIC SYSTEM AND CURRENT HYDROLOGICAL REGIME OF THE STYR RIVER (2020–2022)

V. Yu. Stelmakh

In the era of excessive anthropogenic impact on river basins and the environment, it is important to study the peculiarities of the hydrological regime formation and its changes under the influence of natural and anthropogenic factors. Anthropogenic loads lead to transformations in the structure

¹ кандидат географічних наук, доцент
(Волинський національний університет імені Лесі Українки, м. Луцьк)
e-mail: stelmakh.valia@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7106-4242

of the hydrographic network of river basins and to changes in the morphometric parameters of the river and its tributaries. The aim of the study was to investigate the structure of the hydrographic network of the Styr River basin and to analyze the current hydrological regime of the Styr River in 2020–2022 and its impact on the hydrochemical regime. The article characterizes the hydrographic features and investigates the structure of the hydrographic network of the Styr River. The results of the study are: determination of the hydrographic indicators of the Styr River, its main tributaries and the basin; analysis of the current hydrological regime of the Styr River according to the Volyn Hydrometeorological Center, in particular the level regime, average, maximum, minimum water flows for the last three years 2020–2022, maximum and minimum flow modules; study of the concentration of major ions and water mineralization, average long-term concentrations of total iron, nutrients. The scientific novelty of the study is to carry out an ordinal classification of the Styr basin flows by different methods (Gravelius and Horton), to study the hydrological regime and hydrochemical parameters of the Styr River for 2020–2022, to establish a correlation between the average monthly water discharge and water levels at hydrological stations, which makes it possible to predict water discharge on the Styr River based on measurements of water levels at hydrological stations. The practical significance of the study provides for the possibility of using its results to make informed management decisions on the use and protection of water resources in the basin.

Key words: river basin, river system, hydrographic network, hydrological regime, hydrochemical regime, ordinal classification of flows.

Вступ

На сучасному етапі діяльність людини призводить до погіршення якості води і режиму річкового стоку, перетворення багатьох річок на канали та мережу водосховищ і ставків. Такі антропогенні навантаження провокують перетворення структури гідрографічної мережі річкових басейнів та зміни морфометричних показників річки та її приток. Відповідно, у мовах потужного впливу на річкові басейни населення та промисловості, вивчення гідрографічної мережі дає наукову базу цінної інформації, яка в майбутньому допоможе вирішити ряд проблем з водопостачанням і користуванням даними водними об'єктами. Окрім того, антропогенне навантаження обумовлює зміни гідрологічних показників та визначає сучасний гідроекологічний стан басейнів річок. Спостереження за змінами гідрографічних показників та коливаннями гідрологічного режиму дозволяє розробити рекомендації щодо оптимізації екологічної ситуації в басейні річки.

Мета роботи – дослідити структуру гідрографічної мережі басейну річки Стир, проаналізувати сучасний гідрологічний режим річки Стир за 2020–2022 роки та його вплив на гідрохімічний режим.

Матеріал і методи

Під час проведення досліджень були використано теоретичні та емпіричні методи: історичний, математичний, статистичний, системний, описовий, причинно-наслідкових зв'язків, картографічний, польових спостережень, просторового аналіз, порівняльно-географічний, аналіз та синтез, оціночний, метод аналізування, прогнозування,

а також методи та технічні прийоми обробки отриманої інформації. Для аналізу сучасних гідрологічних особливостей річки Стир використанні матеріали та статистичні дані Волинського обласного центру з гідрометорології, для визначення та уточнення гідрографічних показників застосовано програмне забезпечення Google Earth Pro.

Стан вивчення питання. Дослідженням басейну річки Стир займалися такі вчені: Забокрицька М.Р., Нетробчук І.М., Тарасюк Н.А., Ганущак М.М., Хільчевський В.К., Петлін В.М., Мольчак Я.О., Ільїн Л.В., Павловська Т.С. Проте річка – це динамічна система та частина природного ландшафту, гідрографічні та гідрологічні особливості якої зазнають постійних змін під впливом природних та техногенних чинників. Це потребує регулярного вивчення та дослідження задля вчасного реагування на зміни рівня води та режиму стоку, зміни якості води, зміни руслових процесів задля розробки та впровадження комплексних заходів щодо оптимального використання водних ресурсів.

Результати

Басейн річки Стир охоплює територію трьох адміністративних областей України (Волинська, Рівненська та Львівська), а також частину території Білорусі. Досліджувана річка є правою притокою річки Прип'ять (Кондратюк, 2021). Відповідно до гідрографічного районування території України, затвердженого Верховною Радою у 2016 році, можна стверджувати, що річка Стир належить до басейну р. Дніпро та суббасейну р. Прип'ять (Хільчевський, 2021). Річка Стир бере свій

початок на північних схилах Подільської височини, у межах заболоченої балки біля села Пониква Бродівського району Львівської області. Витік Стиру розташований на висоті 257 метрів над рівнем моря (Ганущак і Тарасюк, 2019).

Сучасна гідрографія басейну р. Стир представлена звивистими, спокійними, з зарослим руслом річками, великою кількістю меліоративних каналів, спрямленими річками, а також водоймами природного та штучного походження й болотами (Ганущак, 2012). Загальна площа басейну річки Стир сягає 13 000 км² з них 12 507 км² охоплює територію України; довжина річки – 494 км, з них 424 км на території України. У відсотковому співвідношенні на території Волинської області розташовано 7% площі басейну і 47% загальної довжини Стира (Регіональний..., 2024). За європейськими критеріями, згідно типології річок по Водній рамковій директиві СЄ за площею водозбору річка Стир є дуже великою річкою, оскільки площа її басейну перевищує 10 тис. км² (Забокрицька і Хільчевський, 2016).

В межах басейну р. Стир, на території України, протікає 581 постійний водний потік, з них 525 – це річки протяжністю менше 10 км, що становлять 91% від загальної кількості річок басейну. Загальна довжина малих річок – 2936 км, у тому числі довжиною менше 10 км – 1684 км (Ганущак і Тарасюк, 2019). Основні притоки р. Стир: р. Радоставка, р. Болдурка, р. Слонівка, р. Пляшівка, р. Липа, р. Іква, р. Серна, р. Конопелька, р. Кормин, р. Річиця, р. Стубла (табл. 1).

Таблиця 1

Праві та ліві притоки р. Стир

Праві притоки	Ліві притоки
Іква	Радоставка
Слонівка	Судилівка
Пляшівка	Чорногузка
Болдурка	Липа
Любка	Серна
Рудка	Лютиця
Кормин	Окінка
Рів	Річиця
Конопелька	Жидувка
Сапалаївка	Омеляник

Похила у межах басейну змінюються від 0,25 до 1,9 ‰. Це зумовлено геолого-геоморфологічною будовою території. На заболоченій території Поліської низовини спостерігаються

найменші похили приток (р. Стубла – 0,25‰, р. Оконка – 0,26‰). В межах басейну р. Стир створено штучні ставки та водосховища, площа яких становить 52,2 км², що складає 0,4% території басейну. Найбільшими штучними водоймами в басейні є Хрінницьке водосховище, розміщене у верхів'ї р. Стир та Млинівське водосховище на р. Іква (Ганущак і Тарасюк, 2019).

Одним із методів вивчення гідрографічних особливостей басейнів річок є здійснення порядкової класифікації потоків, адже дає змогу систематизувати інформацію про річкову мережу, визначити кількість та довжину річок різного порядку, встановити їх ієрархію за розміром та гідрологічними характеристиками. Класична модель (класифікація Гравеліуса) передбачає позначення приток, порядок яких зменшується від початку до гирла головної річки (Стельмах, 2021). На основі даної класифікації річкових потоків басейну р. Стир виділяємо 32 притоки першого порядку, 31 притоку другого порядку, 17 приток третього порядку, 10 приток четвертого порядку (рис. 1а).

Хоча класична низхідна порядкова класифікація річок є простим та зручним методом систематизації гідрографічної мережі, вона має певні обмеження, які варто враховувати при її застосуванні. Такий підхід не завжди точно відображає складну та динамічну природу річкового потоку. Наприклад, дві притоки одного порядку можуть мати значні відмінності за площею водозбору, об'ємом стоку та морфометричними характеристиками, що ускладнює порівняння цих приток, адже їх гідрологічні режими та вплив на головну річку можуть суттєво відрізнитися. Річки одного порядку можуть мати різні типи долин, геологічну будову, режим стоку та інші характеристики, що впливають на їх формування та гідрологічний режим. Згідно із висхідною класифікацією американського гідролога Р. Хортон, найменший потік, називається потоком першого порядку, а найбільший порядок дістає головна річка (Стельмах, 2021). Такий підхід робить цю класифікацію більш точною та інформативною, адже вона враховує природну ієрархію річкового стоку. Відповідно до цієї моделі здійснено порядкову класифікацію потоків басейну річки Стир (рис. 1б). Таким чином, за Хортоном у досліджуваному басейні налічується понад 70 приток першого порядку, 20 приток другого порядку, а власне головна річка отримує третій порядок.

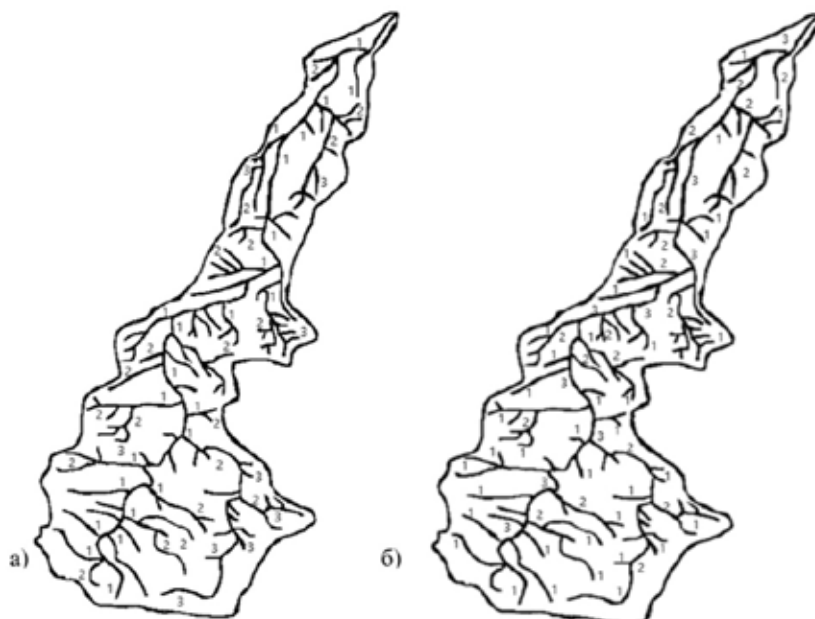


Рис. 1. Модель порядкової класифікації потоків басейну річки Стир а) за методом Гравеліуса; б) за методом Хортон

Гідрологічні дослідження і розрахунки проводяться з урахуванням основних гідрографічних і морфологічних особливостей водних об'єктів і їх водозбірних басейнів.

До основних гідрографічних показників річки та її басейну відносять: довжина річки, коефіцієнт звивистості, падіння річки, похил річки. За допомогою програмного забезпечення Google Earth Pro, було здійснено вимірювання гідрографічних показників Стира та його приток, обчислено відстань гирла приток від гирла річки Стир (табл. 2).

За отриманими результатами було здійснено розрахунок показників головної річки. Висота витoku річки Стир над рівнем моря становить 257 метрів, а гирла – 103 метри. Таким чином падіння річки складає 154 метри, а похил річки 31,2 см/км. Коефіцієнт звивистості визначається відношенням виміряної довжини до довжини прямої і становить 1,2. Аналогічно здійснено обчислення для основних приток р. Стир. Результати проведених обчислень падіння, похилу та коефіцієнту звивис-

Таблиця 2

Результати вимірювання гідрографічних показників р. Стир та її основних приток

Ділянка головної річки, притоки	Вимірювання			Виміряна довжина, км	Істинна довжина, км	Відстань від гирла р. Стир до впадіння притоки, км	Площа водозабору, км ²
	1	2	Середнє				
1	2	3	4	5	6	7	8
Стир	24,7	24,7	24,7	494	494	18 по руслу р. Простир, 75 – р. Стир	13 100
Радоставка	1,2	1,6	1,4	28	29	404	397
Болдурка	1,7	1,9	1,8	36	37		259
Слоновка	2,4	2,4	2,4	48	49	384	549
Пляшівка	2	2	2	40	40		332
Липа	1,9	2,3	2,1	42	43	338	538
Іква	7,7	7,7	7,7	154	155	283	2250
Чорногузка	2,6	2,2	2,4	48	49		552
Конопелька	2,4	2,4	2,4	48	48	205	329
Серна	1,7	1,7	1,7	34	34		271

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5	6	7	8
Оконка	1,7	1,9	1,8	36	37	220	293
Кормин	2,8	2,4	2,6	52	53		716
Любка	0,7	0,7	0,7	14	14		70,3
Рудка	1,2	1,2	1,2	24	25,5		187
Рів	0,7	0,7	0,7	14	14		60,5
Сапалаївка	0,7	0,6	0,65	13	12,4		39,2
Судилівка	1,3	1,3	1,3	26	27		290
Лютиця	1,6	2	1,8	36	37		209,6
Річиця	0,8	0,8	0,8	16	17		264
Жидувка	0,2	0,2	0,2	4	4		9,5
Омеляник	0,8	0,4	0,6	12	12,6		47,63

тості основних приток р. Стир наведені в таблиці 3.

Окрім того, було визначено такі показники басейну річки Стир як коефіцієнт розгалуженості річки, коефіцієнт густоти річкової сітки, коефіцієнт асиметрії басейну, довжина басейну, коефіцієнт форми басейну, середня ширина басейну (табл. 4).

Дослідження водного режиму та динаміки поверхневих вод басейну р. Стир, потребує детального аналізу його основних

компонентів: рівнів води та динаміки їх коливання, середнього багаторічного, максимального та мінімального стоку води та специфіки складових річкових долин.

Основними фазами водного режиму р. Стир – є висока весняна повінь (може проходити у два-три піки через нерівномірне танення снігів або випадання дощів), низька літньо-осіння межень, що майже завжди порушується дощовими паводками та малостійка внаслідок відлиг зимова межень (Ганущак і Тарасюк, 2019).

Таблиця 3

Результати проведених обрахунків падіння, похилу та коефіцієнту звивистості основних приток Стиру

Ділянка головної річки, притоки	Падіння, м	Похил, м/км	Коефіцієнт звивистості
Радоставка	2,2	0,45	1,2
Болдурка	2,7	0,56	0,5
Слонівка	7,9	1,6	1,4
Пляшівка	6,4	1,3	1,5
Липа	3,8	0,77	1,09
Іква	4,4	0,89	1,2
Чорногузка	3,3	0,67	1,1
Конопелька	6,4	1,3	1,1
Серна	5,9	1,2	1,1
Оконка	1,3	0,26	1,25
Кормин	2,3	0,48	1,25
Любка	7,4	1,5	1,4
Рудка	3,9	0,8	1,2
Рів	4	0,82	1,4
Сапалаївка	7,9	1,6	1,2
Судилівка	6,9	1,4	1,1
Лютиця	2,5	0,52	1,08
Річиця	2,6	0,53	1,3
Жидувка	9,3	1,9	1,3
Омеляник	10,9	2,2	1,2

Таблиця 4
Гідрографічні показники басейну річки
Стир

Показник	Отриманий результат
Коефіцієнт розгалуженості річки	2,49
Коефіцієнт густоти річкової системи	0,28
Коефіцієнт асиметрії басейну річки	0,14
Середня ширина	43,7
Коефіцієнт розвитку довжини вододільної лінії	0,73

Сучасний рівневий режим річки Стир за минулі три роки представлений на рисунку 2. Рівні води коливалися в діапазоні від 191 см (22.04.2020 р.) до 464 см (30.03.2021 р.). Найвищі рівні води були притаманні для 2022 року, в якому середній рівень води становив 316 см, у 2021 році

цей показник становив 310 см, а найнижчі рівні у 2020 році – 252 см.

За даними Волинського ЦГМ побудовано графік середньомісячних рівнів води р. Стир (гідропост Луцьк) за період 2020–2022 рр. (рис. 3). Проведений аналіз оброблених статистичних даних засвідчує, що максимальний рівень води (300–420 см) р. Стир спостерігається в березні, під час весняної повені. Мінімальні рівні води (260–300 см) характерні для літніх місяців червень – серпень. Літня межень часто плавно переходить в осінню і триває до жовтня – листопада. За даними графіка бачимо, що осіння межень порушується обложними дощами, що провокують паводки і підняття рівнів води до 300–350 см. Упродовж 2020–2022 рр. стійку зимову межень також порушують часті відлиги, що формують зимові паводки та перешкоджають утворенню сталого льодового покриву.



Рис. 2. Графік щоденних рівнів води р. Стир (гідропост Луцьк) за 2020–2022 рр.*
*Побудовано за даними Волинського ЦГМ (12.07.2024)

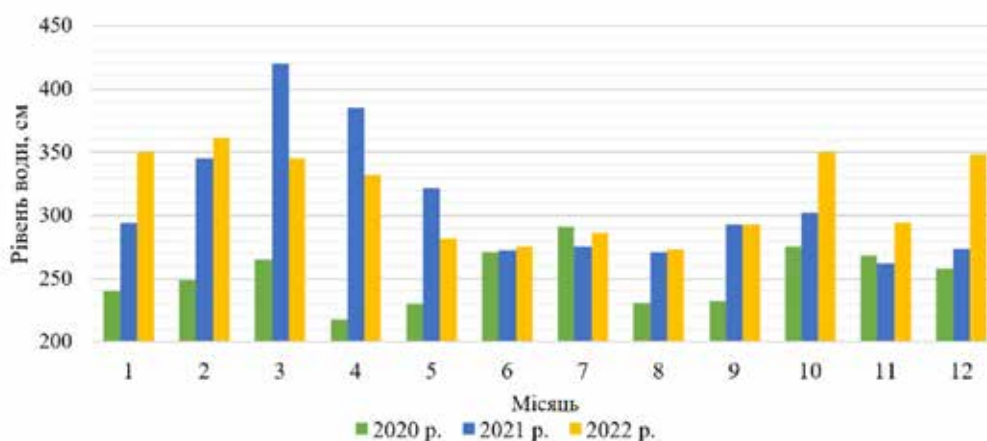


Рис. 3. Середньомісячний рівень води р. Стир (гідропост Луцьк) за період 2020–2022 рр.*
*Побудовано за даними Волинського ЦГМ

Формування мінімального рівня і стоку води у літній період зумовлено насамперед пануванням високих температур та дуже малою кількістю атмосферних опадів, а в зимовий період – низькими температурами, що сприяє утворенню льодового покриву, хоча й нестійкого в останні роки.

Через вплив літніх та осінніх опадів літньо-осінній маловодний період порушується короткочасними, але іноді високими паводками. У басейні р. Стир за минулі 50 років спостерігалось 5 великих паводків, спричинених сильними дощами.

Зимовий меженний період порушується відлигами, внаслідок чого на малих річках басейну р. Стир формуються зимові паводки. Зазвичай рівень води під час паводка не вище рівня повені, але в окремих випадках, коли танення снігу супроводжується випаданням рідких опадів, його висота буде вищою.

Варто зазначити, що у теплий період року, через активний розвиток водної рослинності, здатність заплави пропускати воду відносно зменшується. Витрати води при таких самих рівнях у зарослому річищі будуть у 1,3 – 1,5 разів меншими ніж у руслі без рослинності, окрім того витрати стають ще меншими на заплаві (в 2,5 рази). В ті періоди, коли заплава повністю затоплюється водою, на ній повністю відсутня течія. Саме тому під час паводків вода може бути на високих рівнях (1,5–4,5 м вище межених) 2–3 місяці. Це призводить до затоплення заплави і перешкоджає зниженню рівнів ґрунтових вод на прилеглий території (Ганущак і Тарасюк, 2019).

Загалом, формування максимального стоку річок басейну р. Стир зумовлено випаданням значної кількості атмосферних опадів та дією талих вод.

Максимальні модулі стоку весняної повені змінюються у межах від 34,6 до 163 л/с×км². Величина мінімального стоку змінюється у межах 0,91–1,92 л/с×км². Розподіл модулів середнього річного стоку води коливається в діапазоні 35–40 л/с×км², який змінюється в межах басейну з півночі на південь, що обумовлено проявом широтної зональності на рівнинній території (Лук'янець та ін., 2019).

Середній багаторічний стік річок – це фундаментальний показник, що слугує основою для гідрологічних розрахунків та планування водогосподарських заходів. Він дозволяє оцінювати мінливість стоку в часі та прогнозувати його, розробляти стратегії раціонального використання й охорони водних ресурсів (Ободовський та ін., 2021). Середній багаторічний показник стоку для річки Стир складає 30,9 м³/с, коливання від 1923 року відбувалися від 16,0 м³/с у 2016 році до 53,3 м³/с у 1948 році (Горбачова і Христюк, 2021). Середня витрата води за досліджуваний період 2020–2022 рр. відповідно становлять: 24,8 м³/с у 2022 році; 24,7 м³/с у 2021 році; 17,0 м³/с у 2020 році. Витрати води коливалися у межах 5, 88 м³/с (08.09.2022 р.) – 68,6 м³/с (30.03.2021 р.) (рис. 4).

Річка Стир характеризується змішаним типом живлення із переважанням внутрішньо-ґрунтового та постійного підземного, на які припадає 34,6% та 30,6% відповідно. На снігове та дощове живлення припадає 34,8% (Никонюк та ін., 2024).

В басейні річки Стир спостерігається нерівномірний розподіл внутрішньорічного стоку. Він перш за все обумовлений кліматичними особливостями території, зокрема температурним режимом та кількістю опа-



Рис. 4. Графік щоденних витрат води р. Стир (гідропост Луцьк) за 2020 – 2022 рр.*

*Побудовано за даними Волинського ЦГМ

дів. Окрім того, впливають особливості геоморфологічної будови басейну річки, його розміри та гідрогеологічні умови території (Василенко та ін., 2011). За багаторічний період найбільша частка внутрішньорічного стоку припадає на весняний період 33%, на решту пір року припадає по 21–25% (Никонюк та ін., 2024). Варто зазначити, що через зміни водності років відбуваються зміни у внутрішньорічному розподілі стоку, зокрема у маловодні роки частка весняного стоку зменшується, тоді як частки стоку інших пір року мають тенденцію до зростання (Василенко та ін., 2011). Це означає, що в маловодних роках більша кількість води стікає навесні, коли зазвичай відбувається танення снігу та льоду. У багатоводні роки, коли випадає більше опадів, відповідно більша частка стоку припадає на осінньо-зимовий період.

Максимальна витрата води (30–60 м³/с) – спостерігається в березні та квітні; мінімальні

значення (10–22 м³/с) – червень – серпень. Восени витрата води збільшується за рахунок атмосферних опадів та сягає 18–30 м³/с (рис. 5).

Рівневий режим річки Стир є нерозривно пов'язаним з внутрішньорічним розподілом стоку. Криві, які показують залежність середньомісячних витрат води від рівнів води на гідрологічних постах, розташованих безпосередньо на річці Стир, демонструють тісну кореляційну залежність (рис. 6).

Це означає, що коли рівень води на річці змінюється, витрати води також змінюються відповідно (Никонюк і Стельмах, 2023). Наприклад, коли рівень води підвищується, середньомісячні витрати води зазвичай збільшуються, а при зниженні рівня води – зменшуються (рис. 7).

Ця кореляційна залежність дозволяє прогнозувати витрати води на річці Стир на основі вимірів рівня води на гідрологічних постах. Такий моніторинг допомагає гідро-

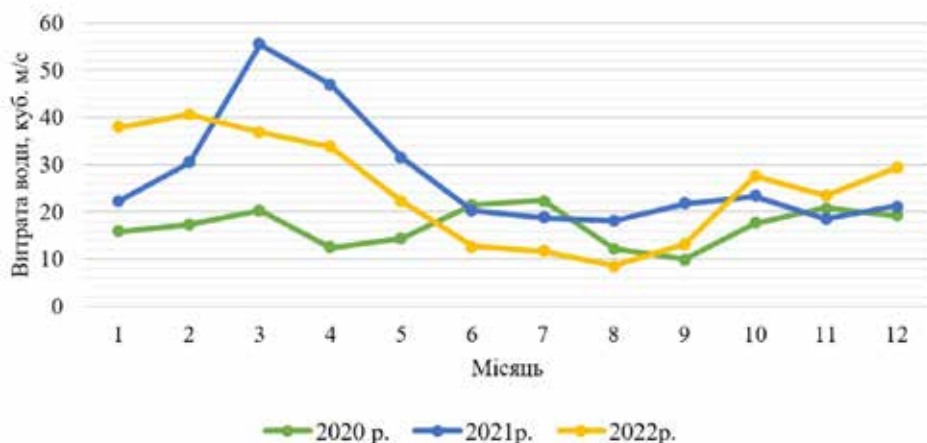


Рис. 5. Середньомісячні витрати води р. Стир (гідропост Луцьк) за період 2020–2022 рр.*

*Побудовано за даними Волинського ЦГМ

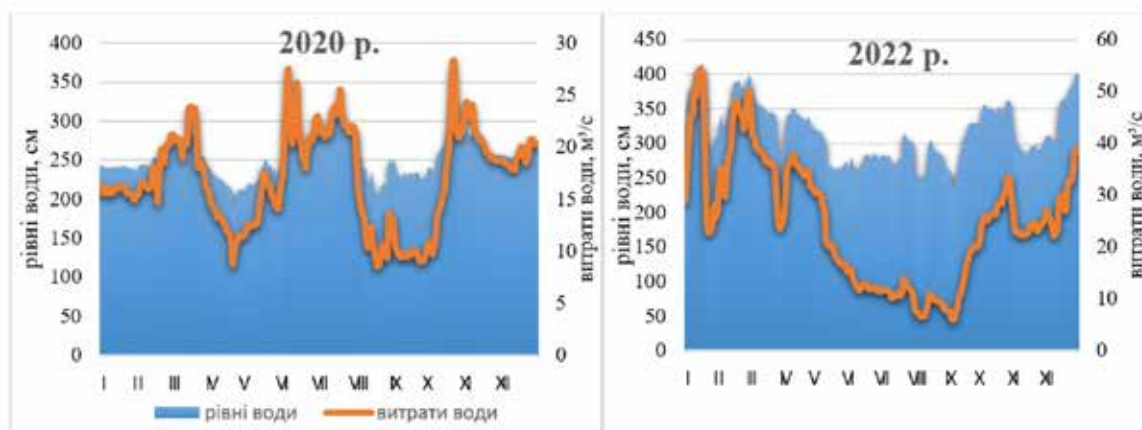


Рис. 6. Графік щоденних рівнів води та витрат води р. Стир (гідропост Луцьк)

логам здійснювати збалансоване управління водними ресурсами басейну Стиру.

Під впливом гідрологічних особливостей формується гідрохімічний режим річки Стир. Впродовж гідрологічного року він змінюється під впливом опадів, випаровування, геоморфологічної будови і геологічних відкладів басейну, величини антропогенного впливу та джерел забруднення (Ганущак і Тарасюк, 2013).

Річкові води Стира з малою і середньою мінералізацією є гідрокарбонатними кальцієвими, рідше гідрокарбонатними магнієво-кальцієвими. За даними Волинського ЦГМ, щодо хімічного складу вод р. Стир за період 2020–2022 рр., встановлено середньорічні концентрації хімічних елементів у водах Стиру. Результати відображено у табл. 5.

Проаналізувавши отримані дані, можна стверджувати, що під впливом, насичених CaCO_3 та MgCO_3 підземних вод в р. Стир сформувався помірна мінералізація та гідрокарбонатний склад води.

Гідрохімічний режим басейну р. Стир є непостійним, що пояснюється зміною протягом року ролі різних видів живлення. Найменша мінералізація річкових вод належить до періоду переважаючого живлення дощовими і талими водами. Живлення підземними водами під час межени сприяє підвищенню мінералізації. Також величина

мінералізації залежить від типу ґрунтів у басейні річки.

За даними Волинського ЦГМ, щодо концентрації головних іонів вод річки Стир за 2020 рік (табл. 6) мінералізація води р. Стир під час зимової межени становить $490,05 \text{ мг/дм}^3$ та збільшується до $1490,94 \text{ мг/дм}^3$ під час літньо-осінньої межени (рис. 8).

Вміст біогенних речовин у р. Стир перебуває у межах зонального фону (табл. 7). Гідрохімічний режим р. Стир має добре виражений сезонний характер та тісно пов'язаний з водним режимом річки (Ганущак і Тарасюк, 2013). Це проявляється у залежності величини мінералізації від витрат вод: збільшення витрат води сприяє зменшенню мінералізації.

Надмірний вплив антропогенного навантаження призвів до порушення природної рівноваги в гідроекосистемі річки Стир, різкого зниження якості водних ресурсів, що спричинило кризовий екологічний стан окремих територій. З метою оптимізації водокористування в басейновій системі необхідними є наступні кроки: зміна системи управління водними ресурсами басейну; посилення державного контролю за скидами неочищених стічних вод; забезпечення власною системою дощової каналізації з очисними спорудами підприємств, що здійснюють виробничу діяльність; зниження впливу осушувальних систем, проведення модерні-

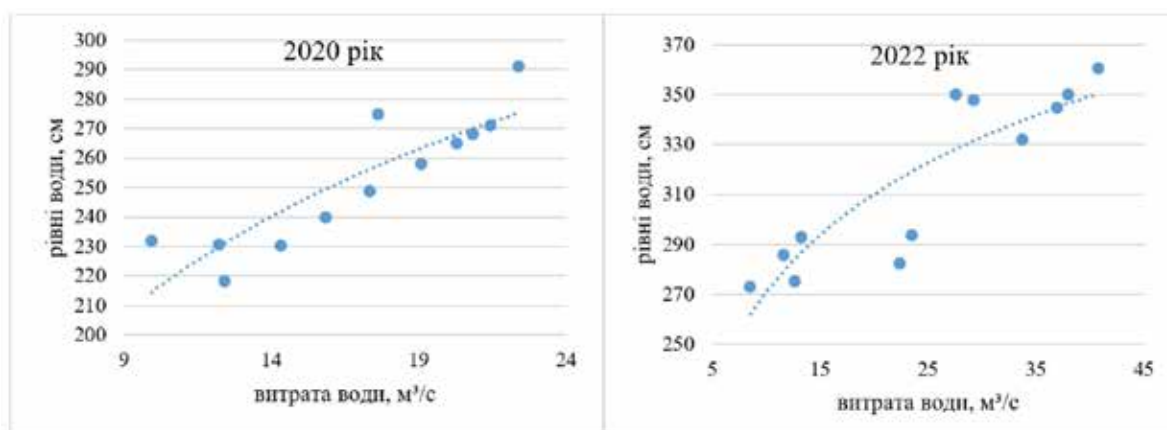


Рис. 7. Крива залежності середніх витрат від рівнів води у р. Стир на гідропосту Луцьк (2020–2022 рр.).

Таблиця 5

Середньорічні значення хімічних елементів вод р. Стир, мг/дм^3 (2020 – 2022 рр.)*

Річка	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	+ K^+	Мінералізація
Стир	166,5	19,9	17,5	96,5	10,4	11,2	12,1	334,2

*Побудовано за даними Волинського ЦГМ

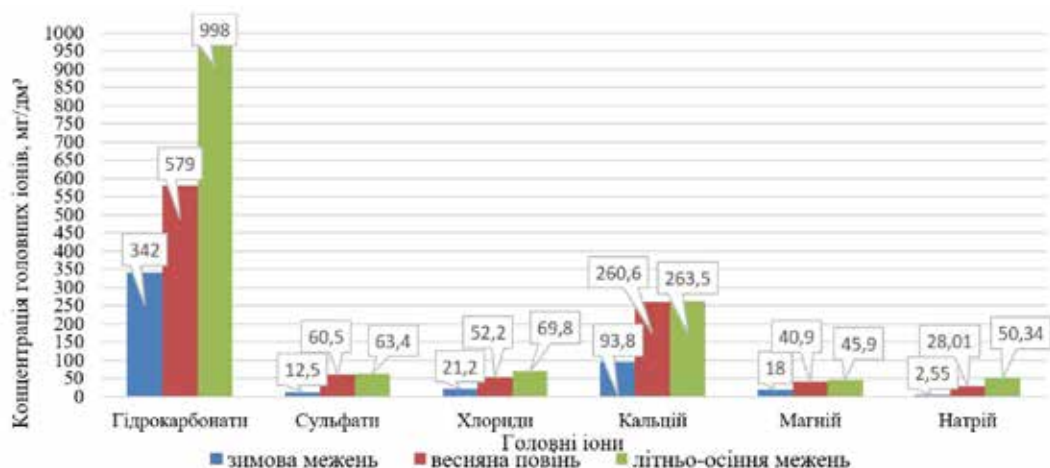


Рис. 8. Концентрація головних іонів води р. Стир – м. Луцьк за 2020 рік

Таблиця 6
Концентрація головних іонів та мінералізація води р. Стир – м. Луцьк за 2020 рік*

Сезон	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Мінералізація, мг/дм ³
Зимова межень	342	12,5	21,2	93,8	18	2,55	490,05
Весняна повінь	579	60,5	52,2	260,6	40,9	28,01	1021,21
Літньо-осіння межень	998	63,4	69,8	263,5	45,9	50,34	1490,94

*Побудовано за даними Волинського ЦГМ

Таблиця 7
Середні концентрації загального заліза, біогенних речовин (мінерального фосфору, кремнію, сполук азоту) у воді р. Стир – м. Луцьк, за 2020 рік, мг/дм³

Сезон	$\text{Fe}_{\text{заг}}$	$\text{P}_{\text{заг}}$	Si	NO_3^-	NO_2^-	NH_4^-
Весняна повінь	0,03	0,09	8,5	0,034	0,006	0,88
Літньо-осіння межень	0,04	0,18	9,5	0,026	0,008	0,98
Зимова межень	0,06	0,08	8,6	0,079	0,011	0,80

зації меліоративної мережі; відновлення меліорованих земель, що не використовуються за призначенням, до їх природного стану; запобігання негативному впливу повеней, паводків шляхом їх прогнозування.

Висновки

Басейн річки Стир зазнає значного антропогенного навантаження, що відображається через виснаження водних ресурсів та погіршення якості води. Щорічний рівень водоспоживання в басейні дослідження складає близько 79,4 млн м³, з яких

28,2 млн м³ припадає саме на поверхневі води (Фесюк та ін., 2023). За таких умов гостро постає необхідність постійного комплексного вивчення та моніторингу сучасного гідрологічного режиму річки Стир та гідрографічних особливостей басейну, особливо в умовах активних кліматичних змін, задля отримання всебічного уявлення про річкову систему, що є ключовим чинником для прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо використання та охорони водних ресурсів басейну.

Список використаної літератури

Василенко Є.В., Дутко О.В., Коноваленко О.С., Данько К.Ю. Закономірності внутрішньорічного розподілу стоку річки Стир та особливості його змін. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2011. № 1 (22). С. 80–87.

Ганущак М.М. Взаємозв'язки змінних показників стану басейнової системи річки Стир як показник стійкості природного середовища. *Матеріали VI Міжнародної наук-практ. конф. аспірантів і студентів «Молода наука Волині: пріоритети та перспективи досліджень» (14–15 травня 2012 р., Луцьк)*. Луцьк, 2012. С. 46–47.

Ганущак М., Тарасюк Н. Водний чинник в розвитку і функціонуванні природно-антропогенних комплексів басейну річки Стир: монографія. Луцьк: Вежа-Друк, 2019. 236 с.

Ганущак М.М., Тарасюк Н.А. Сучасний гідрохімічний режим річки Стир в умовах антропогенного навантаження (на прикладі м. Луцьк). *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2013. Т. 2. С. 54–63.

Горбачова Л.О., Христюк Б.Ф. Прогнозування водності річки Стир на найближчі роки. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2021. № 54. С. 155–164.

Забокрицька М.Р., Хільчевський В.К. Водні об'єкти Луцька: гідрографія, локальний моніторинг, водопостачання та водовідведення. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2016. Т. 3. С. 64–76.

Кондратюк А.В. Моделювання і прогнозування стану забруднення поверхневих вод річки Стир. *Сучасні проблеми Архітектури та Містобудування*. 2021. № 61. С. 395–409. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2021.61.395-409>.

Лук'янець О.І., Ободовський О.Г., Гребінь В.В., Почаєвець О.О., Корнієнко В. О. Просторові закономірності зміни середнього річного стоку води річок України. *Український географічний журнал*. 2021. № 1 (113). С. 6–14. <https://doi.org/10.15407/ugz2021.01.006>.

Никонюк У.С., Ногачевський В.В., Павловська Т.С. Внутрішньорічний розподіл водного стоку р. Стир (гідропост Луцьк, 2020 рік). *Universum*. 2024. № 4. С. 242–248.

Никонюк У.С., Стельмах В.Ю. Особливості гідрологічного режиму річки Стир. *Молода наука Волині: пріоритети та перспективи досліджень: матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених (16–17 травня 2023 р., Луцьк)*. Луцьк: ВНУ ім. Лесі Українки, 2023. С. 170–172.

Ободовський О.Г., Лук'янець О.І., Москаленко С.О., Корнієнко В.О. Узагальнення середнього річного стоку води річок відповідно до гідрографічного районування України. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2019. № 51. С. 158–170. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-51-11>.

Річка Стир. Регіональний офіс водних ресурсів у Волинській області Державного агентства водних ресурсів України (офіційний сайт) [Електронний ресурс]. URL: <https://vodres.gov.ua/pode/1353> (дата звернення: 12.04.2024).

Стельмах В.Ю. Аналіз наукових підходів до визначення структури річкової системи. *Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації»*: зб. наук. праць. Переяслав, 2021. Вип. 74. С. 7–10.

Фесюк В.О., Карпюк З.К., Журба Д.В. Вплив водогосподарського комплексу м. Луцька на забруднення вод р. Стир. *Український журнал природничих наук*. 2023. № 4. С. 177–189. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.4.2023.18>.

Хільчевський В.К. Сучасна характеристика поверхневих водних об'єктів України: водо-токи та водойми. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2021. № 1 (59). С. 17–27. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.1.2>.

Khilchevskiy V.K., Netrobchuk I.M., Sherstyuk N.P., Zabokrytska M.R. Environmental assessment of the quality of surface waters in the upper reaches of the Pripyat basin in Ukraine using different methods. *Journ. Geol. Geograph. Geoecology*. 2022. № 31 (1). P. 71–80. <https://doi.org/10.15421/112207>.

References (translated & transliterated)

Vasylenko, Je.V., Dutko, O.V., Konovalenko, O.S., & Danko, K.Ju. (2011). Zakonomirnosti vnutrishnjorichnogho rozpodilu stoku richky Styr ta osoblyvosti jogho zmin [Patterns of the intra-annual distribution of the Styr River flow and peculiarities of its changes]. *Ghidrologhija, ghidrokhimija i ghidroeologhija [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology]*, 1 (22), 80–87 [in Ukrainian].

Hanushchak, M.M. (2012). Vzajemozv'jazky zminnykh pokaznykiv stanu basejnovoji systemy richky Styr yak pokaznyk stijkosti pryrodnogho seredovyshha [Interrelationships of Variables of the Styr River Basin System as an Indicator of Environmental Sustainability]. *Materialy VI Mizhnarodnoji naukovopraktychnoji onferenciji aspirantiv i studentiv "Moloda nauka Volyni: pryoritety ta perspektyvy doslidzhenj" [Materials of the VI International Scientific and Practical Conference of Postgraduate and Undergraduate Students "Young Science of Volyn: Priorities and Prospects for Research"]*. Lucjk, pp. 46–47 [in Ukrainian].

Hanushchak, M.M., & Tarasiuk N.A. (2019). Vodnyj chynnyk v rozvytku i funkcionuvanni pryrodno-antropoghennykh kompleksiv basejnu richky Styr: monoghrafija [The water factor in the

development and functioning of natural and anthropogenic complexes of the Styr River basin: a monograph]. Lucjk: Vezha-Druk [in Ukrainian].

Hanushchak, M.M., & Tarasiuk N.A. (2013). Suchasnyj ghidrokhimichnyj rezhym richky Styr v umovakh antropoghennogho navantazhennja (na prykladi m. Lucjk) [Modern hydrochemical regime of the Styr River in the conditions of anthropogenic load (on the example of Lutsk)]. *Ghidrologhija, ghidrokhimija i ghidroekologhija [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology]*, 2, 54–63 [in Ukrainian].

Horbachova, L.O., & Khrystiuk, B.F. (2021). Proghnozuvannja vodnosti richky Styr na najblyzhi-chi roky [Forecasting the water content of the Styr River for the coming years]. *Visnyk Kharkivskogho nacionaljnogho universytetu imeni V.N. Karazina. Serija "Gheologhija. Gheografija. Ekologhija" [Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series "Geology. Geography. Ecology"]*, 54, 155–164 [in Ukrainian].

Zabokrytska, M.R., & Khilchevskiy, V.K. (2016). Vodni ob'jekty Lucjka: ghidrografija, lokalnyj monitoryng, vodopostachannja ta vodovidvedennja [Water bodies of Lutsk: hydrography, local monitoring, water supply and sewerage]. *Ghidrologhija, ghidrokhimija i ghidroekologhija [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology]*, 3, 64–76 [in Ukrainian].

Kondratiuk, A.V. (2021). Modeljuvannja i proghnozuvannja stanu zabrudnennja poverkhnevyykh vod richky Ctyr [Modeling and prediction of the state of pollution of surface waters of the river Styra]. *Suchasni problemy Arkhitektury ta Mistobuduvannja [Modern Problems of Architecture and Urban Planning]*, 61, 395–409. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2021.61.395-409> [in Ukrainian].

Lukianets, O.I., Obodovskiy, O.H., Hrebin, V.V., Pochaievets, O.O., & Korniienko, V.O. (2021). Prostorovi zakonomirnosti zminy serednjogho richnogho stoku vody richok Ukrajinj [Spatial patterns of changes in the average annual water flow of rivers of Ukraine]. *Ukrajins'kij ghheografichnyj zhurnal [Ukrainian Geographical Journal]*, 1 (113), 6–14. <https://doi.org/10.15407/ugz2021.01.006> [in Ukrainian].

Nykoniuk, U.S., Nohachevskiy, V.V., & Pavlovska, T.S. (2024). Vnutrishnjorichnyj rozpodil vodnogho stoku r. Styr (ghidropost Lucjk, 2020 rik) [Intra-annual distribution of water flow of the Styr River (gauging station Lutsk, 2020)]. *Universum [Universum]*, 4, 242–248 [in Ukrainian].

Obodovskiy, O.H., Lukianets, O.I., Moskalenko, S.O., & Korniienko, V.O. (2019). Uzagaljnennja serednjogho richnogho stoku vody richok vidpovidno do ghidrografichnogho rajonuvannja Ukrajinj [Generalization of the average annual river water flow in accordance with the hydrographic zoning of Ukraine]. *Visnyk Kharkivskogho nacionaljnogho universytetu imeni V.N. Karazina. Serija "Gheologhija. Gheografija. Ekologhija" [Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series "Geology. Geography. Ecology"]*, 51, 158–170. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-51-11> [in Ukrainian].

Richka Styr. Regional'nyj ofis vodnykh resursiv u Volynskij oblasti Derzhavnogho aghentstva vodnykh resursiv Ukrajinj [Styr River. Regional Office of Water Resources in Volyn Oblast of the State Agency of Water Resources of Ukraine]. [Electronic resource] URL: <https://vodres.gov.ua/node/1353> (access date 12.04.2024) [in Ukrainian].

Stelmakh, V.Ju. (2021). Analiz naukovykh pidkhodiv do vyznachennja struktury richkovoji systemy [Analysis of scientific approaches to determining the structure of the river system]. *Materialy Mizhnarodnoji naukovopraktychnoji internet-konferenciji "Tendenciji ta perspektyvy rozvytku nauky i osvity v umovakh ghlobalizaciji": zbirnyk naukovykh pracj [Materials of the International Scientific and Practical Internet Conference "Tendencies and Prospects for the Development of Science and Education in the Context of Globalization": a collection of scientific papers]*, 74. Perejaslav, pp. 7–10 [in Ukrainian].

Fesiuk, V.O., Karpiuk, Z.K., & Zhurba D.V. (2023). Vplyv vodoghospodars'kogho kompleksu m. Lucjka na zabrudnennja vod r. Styr [Influence of the water management complex of Lutsk on the pollution of the waters of the Styr River]. *Ukrajins'kij zhurnal pryrodnychych nauk [Ukrainian Journal of Natural Sciences]*, 4, 177–189. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.4.2023.18> [in Ukrainian].

Khilchevskiy, V.K. (2021). Suchasna kharakterystyka poverkhnevyykh vodnykh ob'ektiv Ukrajinj: vodotoky ta vodojmy [Modern characterization of surface water bodies of Ukraine: watercourses and reservoirs]. *Ghidrologhija, ghidrokhimija i ghidroekologhija [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology]*, 1 (59), 17–27. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.1.2> [in Ukrainian].

Khilchevskiy, V.K., Netrobchuk, I.M., Sherstyuk, N.P., & Zabokrytska, M.R. (2022). Environmental assessment of the quality of surface waters in the upper reaches of the Pripjat basin in Ukraine using different methods. *Journ. Geol. Geograph. Geoecology*, 31 (1). P. 71–80. <https://doi.org/10.15421/112207> [in English].

Отримано: 25.04.2024

Прийнято: 30.04.2024



ХІМІЯ

УДК 544.773.43+664

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.14>

КІНЕТИКА ВИРОЩУВАННЯ КІЛЕЦЬ ЛІЗЕНГАНГА В ЕЛАСТИЧНИХ ЖЕЛАТИНОВИХ ГЕЛЯХ

**О. М. Камінський¹, Р. О. Денисюк², М. В. Чайка³, С. В. Писаренко⁴,
О. С. Євдоченко⁵, Д. Ю. Панасюк⁶**

Гелі широко використовуються в харчовій, фармацевтичній та косметичній промисловості. Гелями також є деякі побутові (рідке мило, миючий засіб, гелеві кульки для прання, гель-лаки тощо) та харчові (холодець, фруктове желе) речовини, які людина використовує повсякчас. Прикладами гелів можуть служити застигли розчини желатину, агару, пектину, силікатної кислоти; целулоїд, клей, текстильні волокна тощо.

¹ кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: alexkamin@ukr.net
ORCID: 0000-0003-1971-8437

² кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: denisuknet@ukr.net
ORCID: 0000-0003-3077-3795

³ кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: laridae92@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5356-9856

⁴ доктор філософії з галузі знань Хімічна та біоінженерія,
асистент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: snezhunka1107@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5978-487X

⁵ доктор філософії з галузі знань 01 Освіта/Педагогіка, доцент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: evdochenko_lena@ukr.net
ORCID: 0000-0001-6338-5372

⁶ заступник завідувача відділу досліджень матеріалів, речовин і виробів,
завідувач сектору фізико-хімічних досліджень
(Житомирський НДЕКЦ МВС України, м. Житомир),
асистент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: dima.panasuk261195@gmail.com
ORCID: 0009-0005-9490-1823

Особливо широко гелі представлені в рослинних і тваринних організмах, наприклад, м'язова, нервова і сполучна тканини, склоподібне тіло ока, різного виду біологічні мембрани є прикладами складних гелів. Вивчення фізико – хімічних властивостей гелів, можливості протікання реакції у гелях є актуальною задачею.

У роботі досліджено кінетику вирощування кілець Лізенганга в еластичних желатинових гелях.

Показано, що однією з умов утворення чітких кілець Лізенганга в гелі є те, що перший розчин електроліту, який змішується з розчином желатину, повинен бути низької концентрації (до 1 %), а другий – максимально високої (до 90 %).

Встановлено, що протягом першої доби у гелі з $Ag_2Cr_2O_7$ утворилось 14 кілець Лізенганга, відстань між кільцями становила 0,1 см, а сумарний діаметр становив 6-7 см. Протягом наступних днів ніяких змін не спостерігалось, окрім того, що гель висох і став твердим. Такий сухий гель не зазнавав ніяких змін навіть, протягом декількох місяців.

Показано, що протягом 3-12 годин утворилось два кільця з $Cu(OH)_2$, проте, на відміну від кілець $Ag_2Cr_2O_7$, вони були не чітко виражені. За добу сумарний діаметр плями на гелі подвоївся, проте кількість кілець не змінилася. Єдина помітна зміна, яка відбулася за 5 днів, це те, що цей сухий гель у чашці Петрі потрескався і став крихким. Це можливо пов'язано з утворенням солей калію з гідролізатом білкових молекул желатину.

Визначено, що протягом восьми годин на весь діаметр чашки Петрі (12 см) вирости кільця $BaSO_4$, проте чіткої межі між кільцями не вдалося зафіксувати. Протягом 1 доби змін у цьому гелі не спостерігалось. За 2-3 доби гель почав засихати, оскільки почав випаровуватись розчинник (вода).

Процес утворення тріщин не спостерігався.

Показано, що найбільше утворюється кілець з $Ag_2Cr_2O_7$, а найменше – з $BaSO_4$. Таку залежність можна пояснити різною розчинністю утворених солей у гелях та їх можливістю впливати на стійкість гелевої сітки у об'ємі гелю.

Ключові слова: гелі, хімічні реакції у гелях, кільця Лізенганга, реакції осадження, хімія поверхні, фізична та колоїдна хімія, харчова хімія.

KINETICS OF GROWTH OF LYZENGANG RING IN ELASTIC GELATIN GELS

**O. M. Kaminskiy, R. O. Denysiuk, M. V. Chayka, S. V. Pysarenko,
O. S. Yevdochenko, D. U. Panasiuk**

Gels are widely used in the food, pharmaceutical and cosmetic industries. Gels are also some household (liquid soap, detergent, gel balls for washing, gel nail polishes) and food (jelly, fruit jelly) substances that people use all the time.

Examples of gels can be solidified solutions of gelatin, agar, pectin, silicic acid; celluloid, glue, textile fibers, etc.

Gels are especially widely represented in plant and animal organisms, for example, muscle, nerve and connective tissue, the vitreous body of the eye, various types of biological membranes are examples of complex gels. Studying the physics and chemical properties of gels, the possibility of reactions in gels is an urgent task.

The work investigates the kinetics of Lysengang ring growth in elastic gelatin gels. It is shown that one of the conditions for the formation of clear Lisengang rings in the gel is that the first electrolyte solution, which is mixed with the gelatin solution, should be of low concentration (up to 1%), and the second should be as high as possible (up to 90%).

It was found that during the first day, 14 Lisengang rings were formed in the $Ag_2Cr_2O_7$ gel, the distance between the rings was 0.1 cm, and the total diameter was 6-7 cm. During the following days, no changes were observed, except that the gel dried and became solid. Such a dry gel did not undergo any changes even for several months.

It was shown that two rings of $Cu(OH)_2$ were formed within 3-12 hours, however, unlike $Ag_2Cr_2O_7$ rings, they were not clearly defined. During the day, the total diameter of the spot on the gel doubled, but the number of rings did not change. The only noticeable change that occurred after 5 days was that this dry gel in the Petri dish cracked and became brittle. This is possibly due to the formation of potassium salts with the hydrolyzate of gelatin protein molecules.

It was determined that $BaSO_4$ rings grew over the entire diameter of the Petri dish (12 cm) within eight hours, but a clear boundary between the rings could not be recorded. No changes were observed in this gel within 1 day. In 2-3 days, the gel began to dry, as the solvent began to evaporate. The process of formation of cracks was not observed.

It is shown that the largest ring is formed from $Ag_2Cr_2O_7$, and the least from $BaSO_4$. This dependence can be explained by the different solubility of the formed salts in gels and their ability to influence the stability of the gel network in the gel volume.

Key words: gels, chemical reactions in gels, Lisegang rings, precipitation reactions, surface chemistry, physical and colloidal chemistry, food chemistry.

Вступ

Гелі широко застосовуються в мікробіологічних, санітарно-гігієнічних і клінічних лабораторіях для приготування поживних середовищ, для проведення деяких видів електрофорезу, імуноелектрофорезу і для гелі-фільтрації. Поліакріламідний, агаровий і крохмальний гелі використовуються в якості носіїв при електрофорезі в лабораторній діагностиці таких захворювань, як ревматизм, інфаркт міокарда, пневмонії, шизофренія, таласемія та ін. (COU 24.5-37-103:2004 Гелі косметичні. Загальні технічні умови, 2004, Гелі, їх виникнення, будова і властивості).

Процес желатинування (гелеутворення) речовин та розчинів також відіграє велику роль у технології виробництва штучного волокна, деяких вибухових речовин, кондитерській справі тощо (Баранова, 2010).

Як відомо, хімічні процеси в гелях протікають без перемішування, оскільки дифузія речовин виражена слабо і відсутні турбулентні потоки. Завдяки таким властивостям гелів, в середовищі ліогелів та ксерогелів вдається вирощувати кристали малорозчинних сполук досить значних розмірів, концентричні кільця в гелі (кільця Лізенганга) тощо. Також сучасна хімія нанорозмірних частинок не обходиться без використання золь – гелі методів одержання речовин (Камінський та ін., 2013; Petranovska et al., 2015; Abramov et al., 2017).

Гелі також знаходять широке застосування у процесах адсорбції забруднювачів навколишнього середовища, таких як іони важких металів, промислові барвники, залишки продуктів органічного та фармацевтичного синтезу тощо. Використання гелевих адсорбентів вважається екологічно чистим завдяки низькій вартості вихідних матеріалів, а також можливості їх одержання з біоматеріалів (Belala et al., 2011; Abdolali et al., 2014). Наприклад, натрій альгінат є природним полісахаридом, який складається з великої кількості гідроксильних і карбоксильних груп, тому він використовується як сировина для адсорбції іонів важких металів із водних розчинів. Шляхом поверхневого прищеплення та зшивання адсорбенти, синтезовані з натрій альгінату, характеризуються високими адсорбційно-десорбційними показниками щодо

іонів важких металів. Однак низька фізична міцність і звичайна термостабільність значно обмежили використання матеріалів на основі натрій альгінату в промислових цілях. Крім того, у деяких дослідженнях спостерігалось відновлення певних іонів металу, механізм якого не з'ясований.

У роботі авторами (Gao et al., 2020) підсумовано розробку адсорбентів на основі натрій альгінату, включаючи фізико-хімічні властивості полімеру, модифікацію натрій альгінату, композиційних матеріалів на основі цього полімеру, адсорбційну здатність, а також механізми адсорбції. Хелатування, електростатична взаємодія, іонний обмін, відновлення та фотокаталітичне відновлення розглянуто як основні механізми процесу адсорбції.

Досліджено адсорбцію та розділення шестивалентного хрому за допомогою зшитого конденсованого танінового гелю у роботі (Nakano et al., 2001). Хром (VI) окислює танін за допомогою окисно-відновної реакції з утворенням карбоксильної групи на таніновому гелі. Cr було відновлено з Cr(VI) до Cr(III) за допомогою таніну та адсорбовано на карбоксильних і гідроксильних групах танінового гелю за допомогою іонообмінного методу.

Авторами (Камасі & Камасі, 2024) проведено синтез біoadсорбентів на основі натрій альгінату та наночастинок насіння айви методом іотропного гелеутворення. Дані сорбенти використано для адсорбції метиленового синього. Структуру біoadсорбентів і наночастинок досліджено за допомогою інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є (FT-IR), скануючої електронної мікроскопії (SEM), дифракції рентгенівських променів (XRD), термогравіметрії (TG) і Брунауера-Еммета-Теллера (БЕТ) аналізів. Визначено умови адсорбції, зокрема: вплив рН розчину, температури, час контакту, початкової концентрації барвника та дози адсорбенту. Для аналізу результатів експерименту використано моделі кінетики псевдопершого та другого порядку, ізо-терми Ленгмюра та Фрейндліха. Показано, що експериментальні результати можна описати кінетичною моделлю псевдодругого порядку та ізотермою Ленгмюра. Найвища адсорбційна ємність барвника метиленового синього 192,3 мг/г спостерігається за темпе-

ратури 60 °С у присутності натрій альгінату, що містить 5,0% наночастинок насіння айви при рН 7. Також розраховано термодинамічні параметри адсорбції (ΔG° , ΔH° та ΔS°).

У дослідженні (Grigoraş et al., 2022) одержано адсорбент на основі гідрогелю (гелевих кульок), синтезованого шляхом захоплення порошку вишневих кісточок на хітозані. Порошок, одержаний із висушених вишневих кісточок, обережно змішували протягом 24 год з розчином хітозану в оцтовій кислоті. Потім суспензію додавали краплинами в суміш метанолу з натрій гідроксидом і залишали за 4 °С ще на 24 години. Потім гідрогелеві кульки нагрівали зі зворотним холодильником у суміші метанол-глутаровий альдегід протягом 6 годин за 70 °С, щоб забезпечити хорошу стабільність у кислому середовищі. Синтезований матеріал охарактеризовано методами скануючої електронної мікроскопії, інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є та визначено точки нульового заряду. Досліджено адсорбційну здатність видаляти дві моделі азобарвників (кислотний червоний 66 і реактивний чорний 5), що існують в одній формі та в бінарній суміші. Однак, на думку авторів даної роботи, дослідження хімічних процесів, які протікають у об'ємній матриці гелів та можливості взаємодії хімічних речовин між собою у середовищі гелю також залишаються актуальними завданнями. Метою дослідження є вивчення кінетики процесів росту кілець Лізенганга у середовищі еластичного гелю желатини.

Матеріал і методи

У якості вихідних матеріалів використано такі вихідні реактиви та посуд: желатин швидко розчинний ТМ «Мрія»; $K_2Cr_2O_7$ (ч.д.а.); $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (ч.); $BaCl_2 \cdot 2H_2O$ (ч.); $AgNO_3$ (ч.д.а.); KOH (ч.); H_2SO_4 конц. (ч.д.а.); хімічні склянки на 250 мл; скляні чашки Петрі та штативи з лапками.

Відомо, що однією з умов утворення чітких кілець Лізенганга в гелі є те, що перший розчин електроліту, який зміщується з розчином желатини, повинен бути низької концентрації (до 1%), а другий – максимально високої (до 90%).

В якості об'єктів для дослідження було використано солі сульфати, дихромати, хлориди та нітрати, оскільки дані аніони сприяють процесам гелеутворення (займають початкові ланки ліотропних рядів).

Враховуючи те, що розчинність зазначених вище речовин у воді різна (І. О. Усков та ін., 1995), нами було обрано $K_2Cr_2O_7$,

$CuSO_4 \cdot 5H_2O$ та $BaCl_2 \cdot 2H_2O$ в якості розчинів електролітів низької концентрації, а $AgNO_3$, H_2SO_4 та KOH відповідно, як розчини високої концентрації.

Вихідний водний розчин желатину готували відважуючи на електронних вагах 7,5 г желатину, переносили його в хімічну склянку, доводили до мітки 50 мл гарячою дистильованою водою (температура 90–95 °С) та інтенсивно перемішували розчин до повного розчинення желатину. Одержаний розчин гелю ще гарячим фільтрували через ватяний фільтр.

Розчини низької концентрації (0,5%) солей по 50 мл кожен готували відповідно з врахуванням молярних мас кристалогідратів. На електронних вагах відважували 0,5 г $K_2Cr_2O_7$; 0,39 г $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ та 0,29 г $BaCl_2 \cdot 2H_2O$ відповідно; переносили їх у окремі мірні колби та доводили до мітки 50 мл дистильованою водою. Кожен з розчинів добре перемішували до повного розчинення солей.

Розчини високої концентрації (90%) готували у хімічних склянках шляхом відважування кристалічних речовин $AgNO_3$ та KOH відповідної маси та доведенням до мітки 10 мл дистильованою водою кожен. Розчин сульфатної кислоти готували шляхом покрупельного додавання 9 мл конц. H_2SO_4 (98%) до 1,5 мл дистильованої води. Відповідні розчини електролітів готували безпосередньо перед проведенням експерименту, попередньо охолодивши розчини KOH та H_2SO_4 до кімнатної температури.

У хімічній склянці ретельно змішували 50 мл 15% свіжо виготовленого гарячого розчину желатину та 50 мл 0,5% розчину відповідного електроліту низької концентрації (1:1 за об'ємом). Утворений теплий розчин желатину з електролітом обережно розливали у чашки Петрі шаром на 1/2 об'єму посудини та залишали на 2 години для повного застигання гелю.

Далі у центр утвореного гелю піпеткою капали по 10 краплин 90% розчину іншого електроліту (Терещук та ін., 2020; Чуян та ін., 2023). Реакційну суміш поміщали у затемнене місце і фіксувати утворення кілець протягом 1 год; 3 год; 6 год; 12 год; 1 доби; 2 доби та 3 доби.

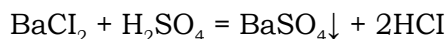
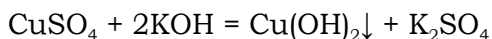
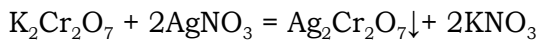
Результати та обговорення

В основі вирощування кілець Лізенганга в гелі лежать реакції обміну між двома електролітами з утворенням осаду.

Слід відмітити, що важливою особливістю протікання таких реакцій є те, що

у середовищі гелей вони відбуваються без перемішування, оскільки дифузія речовин одна в іншу майже відсутня.

Рівняння хімічних реакцій, які відбуваються між електролітами, можна представити у вигляді:



Відповідно, має утворюватись осад (а в гелі – кільця) $\text{Ag}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ коричнево – чорного кольору, $\text{Cu}(\text{OH})_2$ – синього кольору, а BaSO_4 – білого кольору.

Утворені кільця Лізенганга нагадують шарову структуру полосатих агатів.

На рис. 1 показано фотографії першого етапу желатинізації зразків розчинів у чашках Петрі до вирощування кілець Лізенганга.

Як видно з одержаних фотографій в чашках Петрі, гелі з розчином $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ рис. 1 а та гелі з розчином CuSO_4 рис. 1 б абсолютно прозорі, а гель, що містить BaCl_2 рис. 1 в матовий, що, можливо, пов'язано з присутністю нерозчинних домішок у вихідному препараті $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

На рис. 2 показано фотографії кілець Лізенганга, які утворилися в першу годину після додавання розчину високої концентрації електроліту.

Показано, що протягом першої години після додавання відповідного концентрованого розчину до гелю в усіх випадках колір цієї рідкої плями в центрі гелю змінювався на колір відповідного осаду.

Встановлено, що за першу годину утворення коричневого осаду $\text{Ag}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (рис. 2(а)) утворилось одне чітке кільце Лізенганга, а у випадку синього осаду $\text{Cu}(\text{OH})_2$ та білого осаду BaSO_4 рис 2 б, 2 в кільця утворились не чіткі.

За допомогою лінійки встановлено, що діаметр перших кілець $\text{Ag}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ та $\text{Cu}(\text{OH})_2$ становив приблизно 3,5 см, а діаметр кільця осаду BaSO_4 становив 5,5 см, що майже в два рази більше від кілець а та б. Можливо це пов'язано з рідким станом сульфатної кислоти як вихідного прекурсора, а також можливо, що у сильнокислому середовищі рухливість іонів в об'ємі гелю зростає.

В ході експерименту встановлено, що насичений розчин електроліту, який додавали до відповідного гелю, спочатку утворював пляму розчину на поверхні (розчин розтікався, проте видно було його опуклу форму на поверхні), потім ніби поглинався в товщину гелю, а коли досягав дна посудини, розширювався в ширину гелю, утворюючи кільця. Такий механізм проникання розчину в гель частково пов'язаний з процесами набухання гелю, утвореним

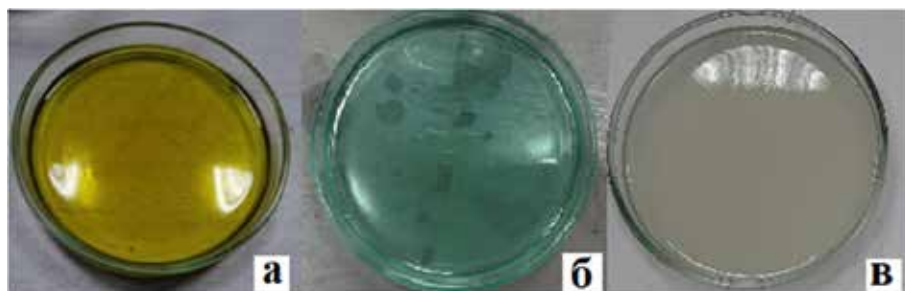


Рис. 1. Гелі розчину желатину з 0,5 % розчином $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (а), CuSO_4 (б) та BaCl_2 (в) відповідно



Рис. 2. Кільця Лізенганга за першу годину контакту гелю з електролітом високої концентрації

такою високомолекулярною сполукою, як желатин.

Відомо, що при утворенні гелю втрачається агрегативна стійкість, тобто частинки (міцели) фази гелю не здатні взаємодіяти між собою або така міжмолекулярна взаємодія слабка, проте кінетичну стійкість (здатність до розшарування) гелі зберігають. Механізмом утворення кілець, відповідно до теорії Оствальда, є результат періодичного перенасичення у структурі гелю. Нерозчинна речовина залишається якийсь час у ненасиченому стані, проте під впливом дифузії вона переміщується до тих пір, доки не досягне рівня перенасичення, потім відбувається утворення шару осаду і процес знову повторюється до того моменту, коли концентрації утвореного осаду буде недостатньо для розриву міцелярної сітки гелю. Саме в цей момент ріст кілець припиняється. Встановлено, що протягом 3–12 годин кілець Лізенганга з $Ag_2Cr_2O_7$ утворилось ще чотири, відстань між кільцями становила 0,1 см, а сумарний діаметр досягав 6–7 см. За першу добу утворилось 8 кілець, відстань між кільцями збільшилась до 0,4 см; а за другу добу – сумарна кількість кілець становила 14. Протягом наступних днів ніяких змін не спостерігалось, окрім того, що гель висох і став твердим (випарувалась вода). Такий сухий гель не зазнавав ніяких змін навіть, протягом декількох місяців.

За такий самий період часу (3–12 годин) утворилось два кільця з $Cu(OH)_2$ (одне темно синє – інше блакитне), проте, на відміну від кілець $Ag_2Cr_2O_7$, вони були не чітко виражені. За добу сумарний діаметр плями на гелі подвоївся, проте кількість кілець не змінилася. Єдина помітна зміна, яка відбулася за 5 днів, це те, що сухий гель у чашці Петрі потріскався і став крихким (рис. 3) (чого не спостерігалось в гелі з $Ag_2Cr_2O_7$), що мож-



Рис. 3. Сухий гель $Cu(OH)_2$ з кільцями Лізенганга

ливо пов'язано з утворенням солей калію з гідролізатом білкових молекул желатину.

Протягом 8 годин на весь діаметр чашки Петрі (12 см) вирости кільця $BaSO_4$, проте чіткої межі між кільцями не вдалося зафіксувати. Встановлено, що за добу змін у цьому гелі не спостерігалось. За 2–3 доби гель почав засихати, оскільки почав випаровуватись розчинник (вода). Процес утворення тріщин не спостерігався.

Даний експеримент дозволяє припустити, що сильнолужне середовище легше руйнує гель желатину з часом, в порівнянні з сильнокислим.

На рис. 4 зображені кільця Лізенганга через три доби від початку експерименту.

На рис. 5 показано гістограму залежності кількості утворених кілець речовиною від часу контакту розчину високої концентрації електроліту з гелем.

Встановлено, що за кількістю утворених кілець, осади можна розташувати в таку залежність: $Ag_2Cr_2O_7 > Cu(OH)_2 > BaSO_4$.

Вивчення процесів формування кілець Лізенганга у гелях дозволяє прогнозувати динаміку процесів формування каменів у нирках, тому дослідження такого розу залишаються перспективними на даному етапі розвитку колоїдної хімії.

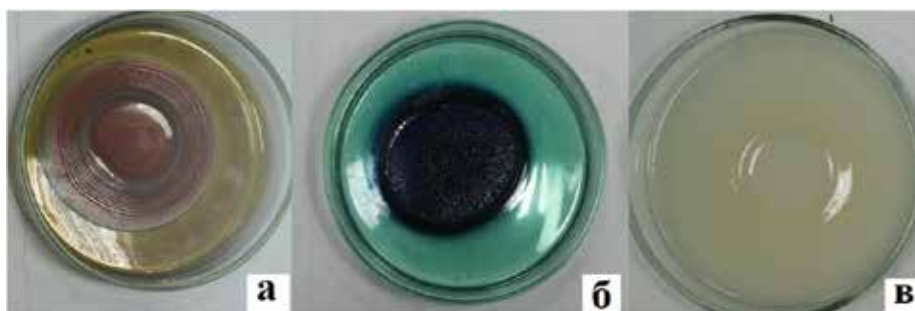


Рис. 4. Кільця Лізенганга в гелях через три доби від початку контакту гелю з електролітом

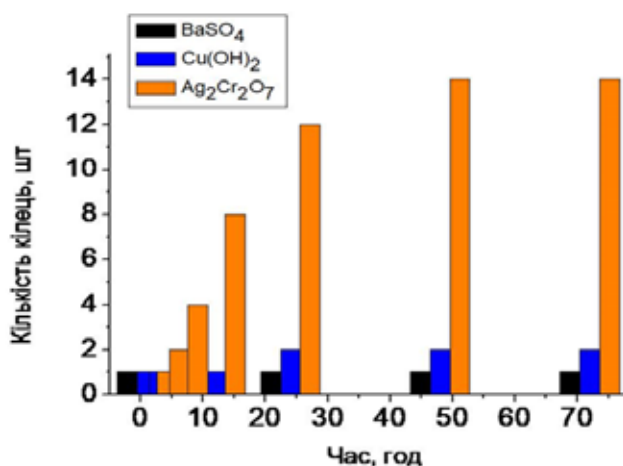


Рис. 5. Гістограма залежності кількості утворених кілець речовиною від часу контакту розчину високої концентрації електроліту з гелем

Висновки

У роботі досліджено кінетику вирощування кілець Лізенганга у еластичних желатинових гелях. Показано, що однією з умов утворення чітких кілець Лізенганга в гелі є те, що перший розчин електроліту, який зміщується з розчином желатину, повинен бути низької концентрації (до 1%), а другий – максимально високої (до 90%).

Встановлено, що протягом першої доби у гелі з Ag₂Cr₂O₇ утворилось 14 кілець

Лізенганга, відстань між кільцями становить 0,1 см, а сумарний діаметр досягає 6–7 см. Протягом наступних днів ніяких змін не спостерігається, окрім того, що гель висихає і стає твердим. Такий сухий гель не зазнає ніяких змін навіть, протягом декількох місяців.

Показано, що протягом 3–12 годин утворилось два кільця з Cu(OH)₂, проте, на відміну від кілець Ag₂Cr₂O₇, вони є не чітко виражені. За добу сумарний діаметр плями на гелі подвоюється, проте кількість кілець не змінюється. Єдина помітна зміна, яка відбувається за 5 діб, це те, що цей сухий гель у чашці Петрі тріскається і стає крихким. Це можливо пов'язано з утворенням солей калію з гідролізатом білкових молекул желатину.

Визначено, що протягом восьми годин на весь діаметр чашки Петрі (12 см) виростають кільця BaSO₄, проте чіткої межі між кільцями не фіксується. Протягом 1 доби змін у цьому гелі не спостерігається. За 2–3 доби гель починає засихати, оскільки випаровується розчинник. Процес утворення тріщин не спостерігається.

Показано, що за кількістю утворених кілець, найкраще утворюються кільця з Ag₂Cr₂O₇, а найгірше – з BaSO₄. Таку залежність можна пояснити різною розчинністю утворених солей у гелях та їх можливістю впливати на стійкість гелевої сітки у об'ємі гелю.

Список використаної літератури

Баранова І.І. Особливості опрацювання гелів на основі бодяги. *Збірник наукових праць співробітників НМАПО ім. П.Л. Шупика*. 2010. № 19 (3). С. 584–588.

Гелі косметичні. Загальні технічні умови : СОУ 24.5-37-103:2004. Київ : Мінагрополітики України, 2004. 6 с.

Гелі, їх виникнення, будова і властивості. [Електронний ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/6272689/page:11/> (дата звернення 10.04.2024).

Камінський О.М., Кусяк Н.В., Петрановська А.Л., Абрамов М.В., Туранська С.П., Горбик П.П., Чехун В.Ф. Адсорбція комплексів *цис*-дихлордіамінплатини наноструктурами на основі магнетиту. *Металофізика та новітні технології*. 2013. Т. 35. № 3. С. 389–406.

Терещук Є.І., Панасюк Д.Ю., Камінський О.М. Вивчення кінетичної стійкості синтетичних нееластичних гелів на прикладі гелю силікатної кислоти. *Актуальні задачі хімії: дослідження та перспективи* : IV Всеукр. наук. конф., 15 квіт. Житомир, 2020. С. 158–159. [Електронний ресурс]. URL: <http://surl.li/ufdvu> (дата звернення 05.03.2024).

Усков І.О., Єременко Б.В., Пелишенко С.С., Нижчик В.В. Колоїдна хімія з основами фізичної хімії високомолекулярних сполук : підручник. Київ : Вища шк., 1995. 142 с.

Чуян Т.В., Горобей К.М., Камінський О.М., Чумак В.В., Денисюк Р.О., Панасюк Д.Ю. Фізико-хімічні особливості взаємодії в гелях. *Перспективи хімії в сучасному світі* : зб. матеріалів III Всеукр. Інтернет-конф. молодих вчених, 22 листоп. 2023 р. Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2023. С. 85–86. [Електронний ресурс]. URL: <http://eprints.zu.edu.ua/id/eprint/38332> (дата звернення 05.03.2024).

Abramov M.V., Kusyak A.P., Kaminskiy O.M., Turanska S.P., Petranovska A.L., Kusyak N.V., Gorbyk P.P. Chapter 1. Magnetosensitive Nanocomposites Based on Cisplatin and Doxorubicin

for Application in Oncology. In: Horizons in World Physics / Editor: Albert Reimer.: Nova Science Publishers, Inc. 2017. Vol. 293. P. 1–56.

Abdolali A., Guo W.S., Ngo H.H., Chen S.S., Nguyen N.C., Tung K.L. Typical lignocellulosic wastes and by-products for biosorption process in water and wastewater treatment: A critical review. *Bioresource Technology*. 2014. V. 160. P. 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.037>.

Belala Z., Jeguirim M., Belhachemi M., Addoun F., Trouvé G. Biosorption of basic dye from aqueous solutions by Date Stones and Palm-Trees Waste: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Desalination*. 2011. V. 271. № 1–3. P. 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.12.009>.

Gao X., Guo C., Hao J., Zhao Z. et al. Adsorption of heavy metal ions by sodium alginate based adsorbent—a review and new perspectives. *International J. of Biological Macromolecules*. 2020. V. 164. P. 4423–4434. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.046>

Grigoraş C.-G., Simion A.-I., Favier L., Drob C., Gavrilă L. Performance of dye removal from single and binary component systems by adsorption on composite hydrogel beads derived from fruits wastes entrapped in natural polymeric matrix. *Gels*. 2022. V. 8 (12). 795 p. <https://doi.org/10.3390/gels8120795>.

Kamacı U.D., Kamacı M. Hydrogel beads based on sodium alginate and quince seed nanoparticles for the adsorption of methylene blue. *Inorganic Chemistry Communications*. 2024. V. 160. 111919 p. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111919>.

Nakano Y., Takeshita K., Tsutsumi T. Adsorption mechanism of hexavalent chromium by redox within condensed-tannin gel. *Water Research*. 2001. V. 35. № 2. P. 496–500. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00279-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00279-7).

Petranovska A.L., Abramov N.V., Turanska S.P., Gorbyk P.P., Kaminskiy A.N., Kussyak N.V. Adsorption of cis-dichlorodiammineplatinum by nanostructures based on single-domain magnetite *J. Nanostruct. Chem.* 2015. V. 5. № 3. P. 275–285. <https://doi.org/10.1007/s40097-015-0159-9>.

References (translated & transliterated)

Baranova, I.I. (2010). Osoblyvosti opratsyuvannya heliv na osnovi bodyahy [Peculiarities of processing gels based on bodiaga]. *Zbirnyk naukovykh prats spivrobotnykiv NMAPO im. P.L. Shupyka [Collection of scientific works of employees of NMAPO named after P.L. Shupyk]*, 19 (3), 584–588 [in Ukrainian].

Heli kosmetychni. (2004). Zahal'ni tekhnichni umovy: SOU 24.5-37-103:2004 [Cosmetic gels. General technical conditions: SOU 24.5-37-103:2004]. Kyiv : Minahropolityky Ukrainy [Ministry of Agrarian Policy of Ukraine] [in Ukrainian].

Heli, yikh vynyknennya, budova i vlastyvoli [Gels, their occurrence, structure and properties]. [Electronic resource]. URL: <https://studfile.net/preview/6272689/page:11/> (access date 10.04.2024) [in Ukrainian].

Kamins'kyy, O.M., Kussyak, N.V., Petranovs'ka, A.L., Abramov, M.V., Turans'ka, S.P., Horbyk, P.P., & Chekhun, V.F. (2013). Adsorbtsiya kompleksiv tsys-dykhlordiaminplatyny nanostrukturamy na osnovi mahnetytu [Adsorption of cis-dichlorodiamineplatinum complexes by magnetite-based nanostructures]. *Metalofizika i noveyshiyte tekhnologii [Metalphysics and the latest technologies]*, 35 (3), 389–406 [in Ukrainian].

Tereshchuk, Ye.I., Panasyuk, D.Yu., & Kamins'kyy, O.M. (2020). Vyvchennya kinetychnoyi stiykosti syntetychnykh neelastychnykh heliv na prykladi helyu sylikatnoyi kysloty [Study of kinetic stability of synthetic inelastic gels on the example of silicate acid gel]. *Aktual'ni zadachi khimiyi: doslidzhennya ta perspektyvy : IV Vseukrayins'ka naukova konferentsiya [Actual tasks of chemistry: research and perspectives: IV All-Ukrainian Scientific Conference]*. Zhytomyr, pp. 158–159. [Electronic resource]. URL: <http://surl.li/ufdv> (access date 05.03.2024) [in Ukrainian].

Uskov, I.O., Yeremenko, B.V., Pelyshenko, S.S., & Nyzhchyk, V.V. (1995). Koloyidna khimiya z osnovamy fizychnoyi khimiyi vysokomolekulyarnykh spoluk [Colloid chemistry with the basics of physical chemistry of high molecular weight compounds]. Kyiv [in Ukrainian].

Chuyan, T.V., Horobey, K.M., Kamins'kyy, O.M., Chumak, V.V., Denysyuk, R.O., & Panasyuk, D.Yu. (2023). Fyzyko-khimichni osoblyvosti vzayemodiyi v helyakh [Physico-chemical features of interaction in gels]. *Perspektyvy khimiyi v suchasnomu sviti: zbirnyk materialiv III Vseukrayins'koyi Internet-konferentsiyi molodykh vchenykh [Prospects of chemistry in the modern world: a collection of materials of the 3rd All-Ukrainian Internet Conference of Young Scientists]*. Zhytomyr. [Electronic resource]. URL: <http://eprints.zu.edu.ua/id/eprint/38332> (access date 05.03.2024) [in Ukrainian].

Abramov, M.V., Kusyak, A.P., Kaminskiy, O.M., Turanska, S.P., Petranovska, A.L., Kusyak, N.V., & Gorbyk, P.P. (2017). Magnetosensitive Nanocomposites Based on Cisplatin and Doxorubicin for Application in Oncology. In: *Horizons in World Physics* / Editor: Albert Reimer.: Nova Science Publishers, 293, 1–56 [in English].

Abdolali, A., Guo, W.S., Ngo, H.H., Chen, S.S., Nguyen, N.C., & Tung, K.L. (2014). Typical lignocellulosic wastes and by-products for biosorption process in water and wastewater treatment: A critical review. *Bioresource Technology*, 160, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.037> [in English].

Belala, Z., Jeguirim, M., Belhachemi, M., Addoun, F., & Trouvé, G. (2011). Biosorption of basic dye from aqueous solutions by Date Stones and Palm-Trees Waste: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Desalination*, 271 (1–3), 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.12.009> [in English].

Gao, X., Guo, C., Hao, J., & Zhao, Z. (Ed.) (2020). Adsorption of heavy metal ions by sodium alginate based adsorbent—a review and new perspectives. *International J. of Biological Macromolecules*, 164, 4423–4434. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.046> [in English].

Grigoraş, C.-G., Simion, A.-I., Favier, L., Drob, C., & Gavrilă, L. (2022). Performance of dye removal from single and binary component systems by adsorption on composite hydrogel beads derived from fruits wastes entrapped in natural polymeric matrix. *Gels*, 8 (12), 795. <https://doi.org/10.3390/gels8120795> [in English].

Kamacı, U.D., & Kamacı, M. (2024). Hydrogel beads based on sodium alginate and quince seed nanoparticles for the adsorption of methylene blue. *Inorganic Chemistry Communications*, 160, 111919. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111919> [in English].

Nakano, Y., Takeshita, K., & Tsutsumi, T. (2001). Adsorption mechanism of hexavalent chromium by redox within condensed-tannin gel. *Water Research*, 35 (2), 496–500. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00279-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00279-7) [in English].

Petranovska, A.L., Abramov, N.V., Turanska, S.P., Gorbyk, P.P., Kaminskiy, A.N., & Kusyak, N.V. (2015). Adsorption of *cis*-dichlorodiammineplatinum by nanostructures based on single-domain magnetite *J. Nanostruct. Chem*, 5 (3), 275–285. <https://doi.org/10.1007/s40097-015-0159-9> [in English].

Отримано: 25.04.2024
Прийнято: 08.05.2024



УДК 544.77+548.5

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.15>

ОДЕРЖАННЯ НАНОЧАСТИНОК ЗОЛОТА З ВИКОРИСТАННЯМ ВАНІЛІНУ

**В. А. Литвин¹, Р. А. Галаган², Е. О. Романенко³,
Ю. А. Шафорост⁴, О. А. Лут⁵**

Наночастинки золота є цікавим об'єктом нанотехнологій завдяки перспективам їхнього застосування у промисловості та медицині. Досліджено особливості перебігу процесу одержання наночастинок золота у реакції відновлення HAuCl_4 природним ароматичним альдегідом ваніліном.

У даному процесі ванілін виконує функцію відновника Au^{3+} іонів та стабілізатора утворених наночастинок золота. Запропоновано метод очистки і концентрування золотого гідрозолу методом іонного обміну. Проведено комплексне дослідження властивостей одержаних наночастинок золота. Спектрофотометричні дослідження показали наявність у спектрі поглинання максимуму при 530 нм, який зумовлений явищем поверхневого плазмонного резонансу. Методом рентгенівської дифракції встановлено, що одержані наночастинки мають ГЦК ґратку з середнім діаметром кристалітів 35 нм. Методом просвічуючої електронної мікроскопії показано, що одержані наночастинки мають сферичну форму з розміром в діапазоні від 10 до 45 нм. Методом циклічної вольтамперометрії досліджено електрохімічну поведінку одержаних наночастинок золота. Встановлено стехіометрію сумарного процесу в системі, яка містить ванілін, гідроген тетрахлоороаурат та натрій гідроксид, яка становить 3:4:16. Запропоновано гіпотетичну модель процесу формування первинних кластерів золота (Au_4), яка задовольняє експериментальні дані.

¹ кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії та наноматеріалознавства
(Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси)
e-mail: litvin_valentina@ukr.net
ORCID: 0000-0003-1236-6344

² старший викладач кафедри хімії та наноматеріалознавства
(Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси)
e-mail: garol@ukr.net
ORCID: 0009-0007-7115-0486

³ магістрантка кафедри хімії та наноматеріалознавства
(Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси)
e-mail: eli.rom2020@gmail.com
ORCID: 0009-0001-6108-4338

⁴ кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії та наноматеріалознавства
(Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси)
e-mail: zdoryulia@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0002-2803

⁵ кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії та наноматеріалознавства
(Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси)
e-mail: lutlen@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0288-4255

Отримані результати свідчать про перспективність подальших досліджень наночастинок золота, одержаних з використанням ваніліну, у зв'язку з можливістю їх використання у різних галузях науки та техніки.

Ключові слова: наночастинки, золото, ванілін, стехіометрія, механізм.

PREPARATION OF GOLD NANOPARTICLES USING VANILLIN

V. A. Litvin, R. L. Galagan, E. O. Romanenko, Yu. A. Shaforost, O. A. Lut

Gold nanoparticles are an interesting object of nanotechnology due to prospects of their application in industry and medicine. The peculiarities of the process of obtaining gold nanoparticles in the reaction of reduction of HAuCl_4 with the natural aromatic aldehyde vanillin were studied. In this process, vanillin acts as a reducer of Au^{3+} ions and a stabilizer of formed gold nanoparticles. A method of purification and concentration of gold hydrosol by the ion exchange method is proposed. A comprehensive study of the properties of the obtained gold nanoparticles was carried out. Spectrophotometric studies showed the presence of a maximum at 530 nm in the absorption spectrum, which is caused by the phenomenon of surface plasmon resonance. Using the X-ray diffraction method, it was established that the obtained nanoparticles have an fcc lattice with an average crystallite diameter of 35 nm. The method of transmission electron microscopy showed that the obtained nanoparticles have a spherical shape with a size in the range from 10 to 45 nm. The electrochemical behavior of the obtained gold nanoparticles was investigated by the method of cyclic voltammetry. The stoichiometry of the total process in the system containing vanillin, hydrogen tetrachloroaurate and sodium hydroxide was established, which is 3:4:16. A hypothetical model of the process of formation of primary clusters of gold (Au_4) is proposed, which satisfies the experimental data. The obtained results indicate the perspective of further research of gold nanoparticles obtained using vanillin, in connection with the possibility of their use in various fields of science and technology.

Key words: nanoparticles, gold, vanillin, stoichiometry, mechanism.

Вступ

Актуальність різностороннього вивчення золота у нанодисперсному стані обумовлена рідкісним поєднанням цінних якостей: унікальні оптичні властивості, обумовлені плазмонним поглинанням, розвинена поверхня, потужна каталітична дія, висока ємність подвійного електричного шару та інші (Bai et al., 2020). Завдяки цьому наночастинки золота можуть слугувати матеріалом для створення електронних, оптичних, сенсорних пристроїв нового покоління, у медицині вони знаходять застосування у діагностиці та лікуванні онкологічних захворювань і т.п. (Bai et al., 2020; Hu et al., 2020; Hammami et al., 2021).

Існує багато способів переведення компактного золота у нанодисперсний стан. Найбільш відомими є електроерозійний спосіб, конденсація пари металу на охолодженій основі, спільна конденсація пари металу та полімеру, радіаційне відновлення йонів Au^{3+} у присутності речовин-стабілізаторів, хімічне відновлення розчинних солей Au^{3+} тощо (Alle et al., 2020; Hu et al., 2020; Alabdallah et al., 2021). Однак методи хімічного відновлення набули найбільшого поширення завдяки простоті синтезу та можливості контролювати розміри

та форму наночастинок шляхом зміни умов синтезу.

Найбільш широко дослідженим синтезом наночастинок золота є цитратний метод (Oliveira et al., 2023), який був представлений Фарадеєм у 1857 році та згодом удосконалений Френсом (Frens et al., 1973), а також метод 2-фазної екстракції з борогідридним відновленням, описаний Вілкоксоном та ін. (Wilcoxon et al., 1993) і вдосконалено Brust et al. (Brust et al., 1994). На сьогодні одержання нанозолота у вигляді нанострижнів, нанониток та наносфер хімічним відновленням іонів тетрахлораурату у науковій періодиці присвячено дуже велику кількість робіт (Edwards et al., 2007; Litvin et al., 2014; Amina et al., 2020; Yenda et al., 2022; Oliveira et al., 2023). У ролі відновників та стабілізаторів використовують різноманітні органічні та неорганічні речовини.

В останнє десятиліття особливої популярності набули «зелені методи» синтезу, які передбачають використання природних біологічних систем в ролі відновників, зокрема рослинних екстрактів, бактерій, грибів, водоростей (Husen et al., 2017; Abdelghany et al., 2019; Santhosh, 2022). Зелений синтез наночастинок срібла має переваги перед фізичними, хімічними та мікробіологічними

процедурами синтезу, оскільки він є дешевим, екологічно чистим, зручним одноетапним методом, який легко масштабується та не потребує використання високого тиску, енергії, температури і отрутохімікатів для виробництва.

Дуже часто поза увагою дослідників залишається характер трансформації складних органічних відновників у ході окисно-відновного процесу. Обов'язковою ланкою цього процесу має бути утворення атомних кластерів металу, які є безпосередніми будівельними елементами для наночастинок. Як правило, постулюється двохелектронне окиснення органічних молекул. При цьому загальна стехіометрія також часто залишається поза увагою.

Ароматичний альдегід ванілін (3-метокси-4-гідроксибензальдегід) є відносно мало дослідженим відновником, який було використано у синтезі наночастинок золота. Використання ваніліну в ролі відновника у процесі одержання наночастинок золота описано лише в одній науковій статті, доступній у Web-пошуку (Arga et al., 2019). Цей синтез, без сумніву, можна вважати «зеленим», адже ванілін є продуктом природного походження. Речовину добувають з плодів тропічної ліани *Vanilla planifolia* та широко використовують у харчовій і парфумерній промисловості. Автори публікації не ставили собі за мету дослідити механізм цього процесу. Хімізм процесу утворення первинних кластерів з атомів золота, які є попередниками золотих наночастинок залишається дотепер невідомим. Тому метою роботи було встановлення експериментальним шляхом сумарної стехіометрії процесу і розробка гіпотетичного механізму формування атомних металокластерів, як попередників наночастинок металічного золота.

Матеріали і методи

При проведенні досліджень були використані наступні реактиви: 0,1 М розчин NaOH (х.ч.), 0,05 М розчин HAuCl_4 (х.ч.), 0,05 М розчин ваніліну (х.ч), дистильована вода.

Для встановлення стехіометрії процесу було проведено ряд синтезів з різними варіантами молярного співвідношення реагентів для пошуку максимуму оптичної густини в діапазоні $\lambda = 520\text{--}530$ нм (табл. 1).

В типовому експерименті в стакан на 150 мл наливали воду, в такому об'ємі, щоб з урахуванням об'ємів розчинів реактивів, що додаються, загальний об'єм розчину склав 50,0 cm^3 . Спочатку додавали розчини ваніліну і луку, а потім, при перемішуванні, розчин $\text{H[AuCl}_4]$. Стакан з реакційною сумішшю ставили у водяну баню за температури 80–90 °С і витримували протягом 20 хв. Далі вимірювали рН реакційної суміші та її оптичну густину при довжинах хвиль 450, 530 та 700 нм.

Спектри поглинання розчинів, що містять наночастинок золота знімали на спектрофотометрі СФ-26. Зразок готували шляхом відбору 1,5 мл одержаного гідрозолу золота і розбавлення дистильованою водою в мірній колбі на 25 мл. Розчином порівняння слугувала дистильована вода. Спектри поглинання знімали в діапазоні 320–600 нм в кюветах товщиною 1 см.

Рентгенівські дифрактограми знімали на дифрактометрі ДРОН-2. Для приготування зразку одержаний золь золота осаджували Cu^{2+} йонами, осад центрифугували і промивали дистильованою водою, після цього його висушували в сушильній шафі при температурі 60 °С. Отриманий порошок змішували з водною емульсією клею ПВА і наносили на спеціальну пластинку, яку потім поміщали у дифрактометр.

Таблиця 1

Варіанти молярних співвідношень реагентів синтезів

№ досл.	$V(\text{Van})$	$V(\text{NaOH})$	$V(\text{HAuCl}_4)$	$\text{pH}_{\text{кін.}}$	D_{450}	D_{530}	D_{700}	$V(\text{H}_2\text{O})$
1	1,00	0,3	1,0	3,32	0,510	0,110	0,021	45,00
2	0,70	0,3	1,0	3,25	0,527	0,120	0,015	45,30
3	0,50	0,3	1,0	3,45	0,065	0,128	0,017	45,50
4	0,70	0,4	1,0	4,50	0,070	0,140	0,022	44,30
5	0,70	0,2	1,0	3,15	0,075	0,145	0,016	46,30
6	0,75	0,2	1,0	3,05	0,079	0,147	0,009	46,25
7	0,75	0,2	1,2	3,07	0,083	0,135	0,010	46,10
8	0,70	0,2	0,8	3,21	0,078	0,130	0,015	46,50
9	0,70	0,25	1,4	3,52	0,070	0,123	0,018	45,40

Геометричні параметри наночастинок золота вивчали на електронному мікроскопі JEM-200A фірми "JEOL" (Японія). Розподіл наночастинок за розмірами проводили на основі отриманих електронних зображень шляхом вимірювання не менше ніж 100 частинок.

Результати та обговорення

Змішування ваніліну з гідроген тетрахло-рауратом у лужному середовищі приводить до утворення стійкого гідрозолу, що містить наночастинки золота. Під час реакції ванілін відновлює іони Au^{3+} іони та інкапсулює наночастинки золота, щоб запобігти агломерації та створити бар'єр для росту частинок. Одержані гідрозолі у прохідному світлі мали глибокий пурпуровий колір та ледь помітну опалесценцію у відбитому світлі. Для дуже розведеного гідрозолу спостерігали явище Тіндаля, внаслідок розсіяння світла на наночастинках при пропусканні променя крізь гідрозоль (рис. 1). Таке явище може слугувати надійним індикатором наявності в середовищі частинок, співмірних з довжинами хвиль видимого електромагнітного випромінювання (300–700 нм). Як відомо, молекулярно-дисперсними системами це випромінювання не розсіюється.

Спектрофотометричне дослідження одержаного розчину показало наявність в спектрі поглинання смуги з максимумом при 530 нм, що є характерним для наночастинок золота і пояснюється явищем поверхневого плазмонного резонансу (див. рис. 1). Оскільки спектр поглинання одержаних наночастинок золота містить лише один максимум, то можна зробити висновок про сферичну форму одержаних наночастинок.

Проведення серії препаративних синтезів гідрозолів золота з ваніліном при

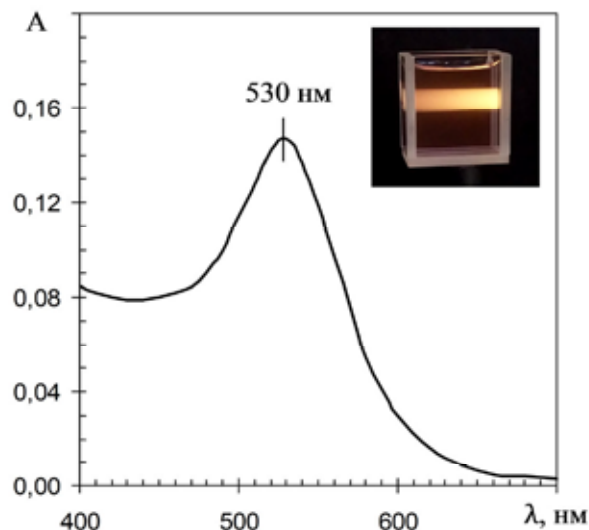
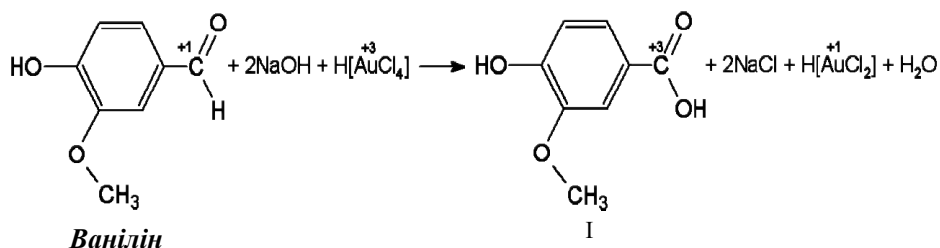


Рис. 1. Спектр поглинання гідрозолу золота та явище Тіндаля у гідрозолі золота

зміні молярного співвідношення реагентів $n_{\text{Van}} : n_{\text{Au}} : n_{\text{OH}}$, для пошуку максимуму оптичного поглинання при довжині хвилі 520–530 нм дозволило експериментально встановити стехіометрію процесу. З табл. 1 видно, що стехіометрія сумарного процесу в системі, яка містить ванілін у ролі відновника та попередника стабілізуючих молекул, натрій гідроксид та гідроген тетрахло-рауратну кислоту може бути виражена таким молярним відношенням реагентів: $n(\text{Van}) : n(\text{HAuCl}_4) : n(\text{NaOH}) = 3 : 4 : 16$.

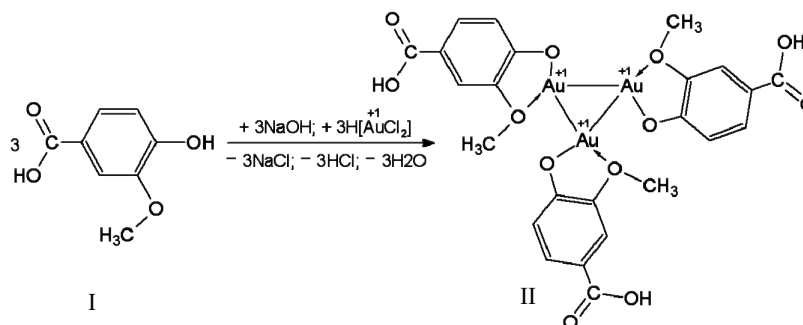
Відповідно до цього співвідношення нами запропоновано гіпотетичну модель процесу яка задовольняє експериментальні дані.

Першою стадією процесу може бути окиснення ваніліну тетрахлоауратною кислотою до 3-метокси-4-гідроксибензенової (ванілінової) кислоти (I).



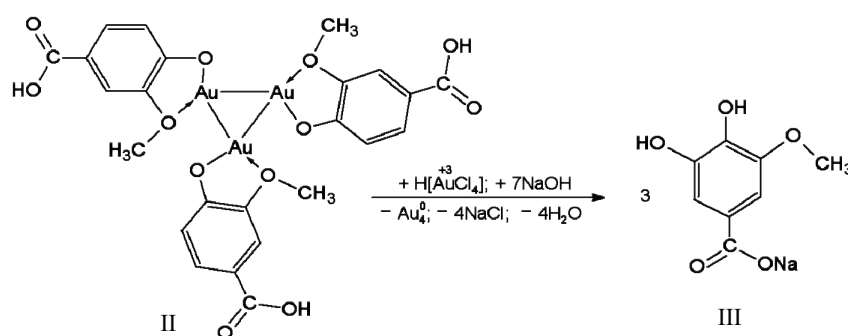
Окисник у цій стадії відновлюється до гідроген дихлороаурату, який у наступній

реакції утворює з ваніліновою кислотою триядерний кластерний комплекс (II):

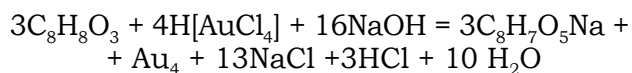


У наступній, третій стадії, в результаті подальшого окиснення тетрахлорауратною кислотою цей комплекс руйнується, вивільняючи кластер з чотирьох атомів Au.

Органічні ліганди при цьому зазнають двоелектронного окиснювального гідроксидування утворюючи 3-метокси 4,5-дигідроксибензену кислоту (III) за Елбсом:



Сумарне рівняння в молекулярній формі можна записати так:



Можна припустити, що саме сіль органічної кислоти III є тою речовиною яка формує на поверхні наночастинок захисну оболонку внаслідок адсорбції.

Одним із важливих завдань даного дослідження була розробка методики очистки гідрозолу від електролітів, присутність яких не дозволяє одержувати концентровані розчини золотих наночастинок. Традиційно така очистка здійснюється методом діалізу. Нами було зроблено спробу виконати знесення гідрозолу методом діалізу на мембрані з целюлози, але за 5 годин електропровідність гідрозолу знизилася лише на 1,3%. З огляду на низьку ефективність цього методу постійно тривають пошуки альтернативних способів очистки. Наприклад у (Куліца, 2020) запропоновано використовувати метод екстракційного розподілу між двома рідкими фазами.

Нами була розроблена техніка знесення, що ґрунтується на іонному обміні. Наночастинок золота мають на своїй поверхні адсорбовані аніони ванілінової

кислоти, для яких протіонами у розчині є катіони натрію. Вони утворюють нерозчинні продукти з двозарядними катіонами, наприклад з Ca^{2+} , а отже при додаванні розчинної солі кальцію, вони випадають в осад. Після центрифугування на швидкості 3000 об/хв осад утворює щільний шар на дні центрифужної посудини. Після зливання надосадового розчину і промивки дистильованою водою осад диспергували в невеликому об'ємі води та додавали підібрану зарані кількість катіоніту КУ-2-8 у Na формі. Суміш збовтували 5 хв. Катіоніт відфільтровували через скляний фільтр. Після відділення зерен катіоніту на фільтрі осад висушували у чашці Петрі. При додаванні води до сухого осаду він знову може бути переведений у стан гідрозолу. Характерною особливістю шару сухого осаду є його низька електропровідність, що може свідчити про обмежену кількість контактів між власне металічними частинками.

Дослідження кристалічної структури наночастинок проводили методом рентгеноструктурного аналізу. Отримана дифрактограма наночастинок золота наведена на рис. 2.

Характерні піки при кутах розсіяння (2θ) близько $48,6^\circ$, $56,8^\circ$, $84,5^\circ$, $104,1^\circ$ і $110,9^\circ$

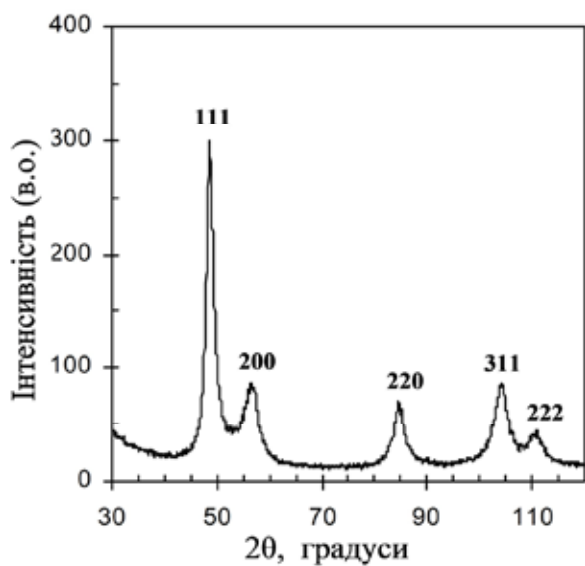


Рис. 2. Дифрактограма наночастинок золота ($\lambda_{Fe} = 0,1936 \text{ nm}$)

відповідають (111), (200), (220) і (311) гра-
нецентрованої кубічної структури металіч-
ного золота. На дифрактограмі видно роз-
ширення ліній порівняно із стандартом, що

пояснюється проявом розмірних ефектів
утворених частинок. Врахування даної осо-
бливості і використання формули Шеррера,
дозволило розрахувати середній діаметр
утворених наночастинок золота, який ста-
новить 28 нм. Міжплощинна відстань одер-
жаних наночастинок становить 0,2361 нм.
Стала ґратки одержаних наночастинок
золота становить 0,4089 нм. Даний резуль-
тат добре узгоджуються зі значеннями стан-
дартів (0,4079 нм, карта PDF Номер 4-0784).

Методом просвічуючої електронної
мікроскопії було досліджено морфологію та
розподіл за розмірами синтезованих нано-
частинок золота. З рисунка 3 видно, що
одержані наночастинки мають сферичну
форму з розміром від 10 до 45 нм.

Матеріал, з якого складаються нано-
частинки золота – це нульвалентне золото.
Тому їх вольтамперометричне дослідження
можна проводити лише в анодній ділянці
потенціалів. В нашій роботі було знято
циклічну вольтамперограму (ЦВА) залеж-
ності для наночастинок і порошку масив-
ного золота на фоні 1 М хлоридної кислоти
(рис. 4). Золото з порошку наносили на пла-

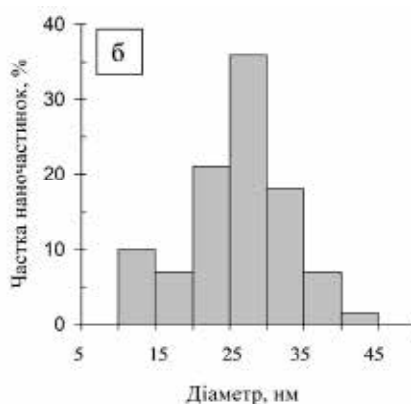
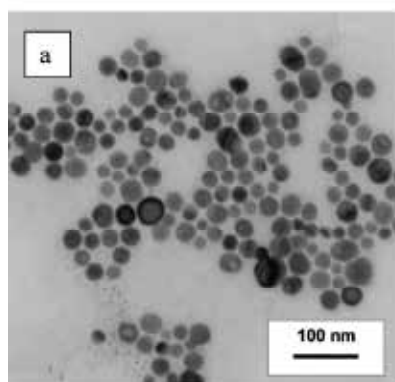


Рис. 3. ПЕМ зображення наночастинок золота (а) та їх розподіл за розмірами (б)

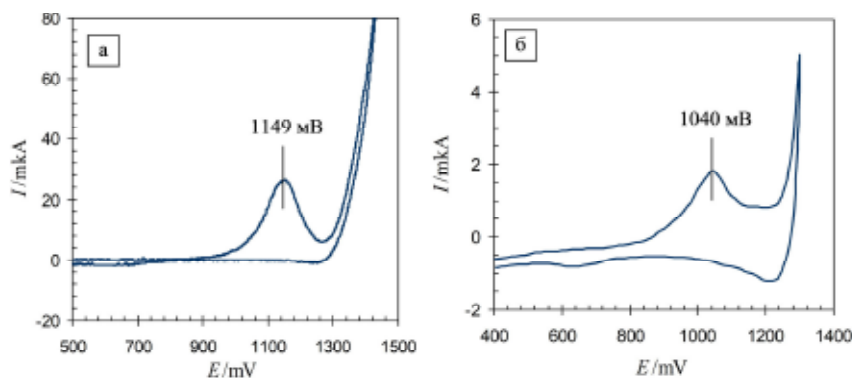
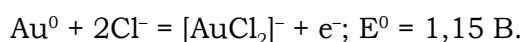


Рис. 4. ЦВА залежності для макроскопічного порошку (а) і наночастинок золота (б)
на фоні 1 М НСІ. Швидкість сканування потенціалу 50 мВ/с

тиновий електрод механічним способом, проводячи площиною дискового електроду по невеликій кількості порошку на фільтрувальному папері. Імобілізація наночастинок здійснювалася висушуванням краплі гідрозолу на поверхні електрода.

На одержаних кривих спостерігається один максимум анодного струму. Потенціал окиснення макроскопічних частинок золота дорівнює 1,15 В, а для нанозолота його значення на 109 мВ нижче і дорівнює 1,04 В. Виходячи з потенціалу анодного окиснення макроскопічних частинок можемо зробити висновок про характер електродної реакції:



Висновки

Продемонстровано ефективність використання природного ароматичного альдегіду

ваніліну в ролі відновника і стабілізатора у синтезі наночастинок золота. Визначено молярні співвідношення між реагентами в процесі формування наночастинок золота у ході відновлення іонів Au^{3+} ваніліном. Постульовано характер теоретично можливих реакцій перетворення органічного відновника у складі супрамолекулярного ансамблю та утворення атомарного кластера Au_4 , як попередника наночастинок Au. Встановлено, що утворені наночастинок мають сферичну форму з середнім діаметром 35 нм та ГЦК ґраткою. Методом ЦВА встановлено, що електрохімічне окиснення наночастинок золота на платиновому електроді в хлоридному середовищі проходить до $\text{Au}(\text{I})$: $\text{Au}^0 + 2\text{Cl}^- = [\text{AuCl}_2]^- + \text{e}^-; E^0 = 1.15 \text{ В.}$ Запропоновано метод очистки і концентрування золотого гідрозолу за методом іонного обміну на катіоніті КУ-2-8 у Na формі.

References

- Abdelghany, A.M., Oraby, A.H., & Farea, M.O. (2019). Influence of green synthesized gold nanoparticles on the structural, optical, electrical and dielectric properties of (PVP/SA) blend. *Phys. B*, 560, 162–173. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2019.02.029> [in English].
- Alle, M., Lee, S.-H., & Kim, J.-C. (2020). Ultrafast synthesis of gold nanoparticles on cellulose nanocrystals via microwave irradiation and their dyes-degradation catalytic activity. *J. Mater. Sci. Technol*, 41, 168–177. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.11.003> [in English].
- Amina, S.J., & Guo, B. (2020). A Review on the Synthesis and Functionalization of Gold Nanoparticles as a Drug Delivery Vehicle. *International Journal of Nanomedicine*, 15, 9823–9857. <https://doi.org/10.2147/IJN.S279094> [in English].
- Arya, S.S., Sharma, M.M., & Das, R.K. (2019). Vanillin mediated green synthesis and application of gold nanoparticles for reversal of antimicrobial resistance in *Pseudomonas aeruginosa* clinical isolates. *Heliyon*, 5, 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02021> [in English].
- Bai, X., Wang, Y., Song, Z., Feng, Y., Chen, Y., Zhang, D., & Feng, L. (2020). The Basic Properties of Gold Nanoparticles and their Applications in Tumor Diagnosis and Treatment. *Int. J. Mol. Sci.*, 21, 2480. <https://doi.org/10.3390/ijms21072480> [in English].
- Brust, M., Walker, D., Bethell, D., Schiffrin, & Whiman, R. (1994). Synthesis of Thiol-derivatised Gold Nanoparticles in a Twophase Liquid-Liquid System. *J.Chem.Soc., Chem. Commun.*, 801–812. <https://doi.org/10.1039/C39940000801> [in English].
- Edwards, P.P., & Thomas, J.M. (2007). Gold in a Metallic Divided State – from Faraday to Present-Day Nanoscience. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 46, 5480. <https://doi.org/10.1002/anie.200700428> [in English].
- Frens, G. (1973). Controlled nucleation for the regulation of the particle size in monodisperse gold suspensions. *Nature physical science*, 241, 20–22. <https://doi.org/10.1038/physci241020a0> [in English].
- Hammami, I., Alabdallah, N.M., Aljomaa, A., & Kamoun, M. (2021). Gold nanoparticles: Synthesis properties and applications. *Journal of King Saud University: Science*, 33(7), 101560. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101560> [in English].
- Hu, X., Zhang, Y., Ding, T., Liu, J., & Zhao, H. (2020). Multifunctional gold nanoparticles: A novel nanomaterial for various medical applications and biological activities. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 8, 1–17. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00990> [in English].
- Husen, A. (2017). Gold Nanoparticles from Plant System: Synthesis, Characterization and their Application. In: Ghorbanpour, M., Manika, K., Varma, A. (eds) *Nanoscience and Plant-Soil Systems. Soil Biology*, 4, 455–479. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46835-8_17 [in English].

Kulua, I., Huang, R., Rotello, V.M. (2020). A modified and simplified method for purification of gold nanoparticles. *MethodsX*, 7, 103–107. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100896> [in English].

Litvin, V.A., & Minaev, B.F. (2014). The size-controllable, one-step synthesis and characterization of gold nanoparticles protected by synthetic humic substances. *Materials Chemistry and Physics*, 144, 168–178. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2013.12.039> [in English].

Oliveira, A.E.F., Pereira, A.C., Resende, M.A.C., & Ferreira, L.F. (2023). Gold Nanoparticles: A Didactic Step-by-Step of the Synthesis Using the Turkevich Method, Mechanisms, and Characterizations. *Analytica*, 4 (2), 250–263. <https://doi.org/10.3390/analytica4020020> [in English].

Santhosh, P.B., Genova, J., & Chamati, H. (2022). Green Synthesis of Gold Nanoparticles: An Eco-Friendly Approach. *Chemistry*, 4, 345–369. <https://doi.org/10.3390/chemistry4020026> [in English].

Wilcoxon, J.P., Williamson, R.L., & Baughman, R. (1993). Optical properties of gold colloids formed in inverse micelles. *The journal of Chemical Physics*, 98 (12), 9933–9950. <https://doi.org/10.1063/1.464320> [in English].

Yenda, T.B., Jiglaire, C.J., & Khichane, I. (2022). Controlled synthesis of small water-soluble hybrid gold nanoparticles. *Frontiers in Mech. Eng.*, 8, N3, 37–45. <https://doi.org/10.3389/fmech.2022.824837> [in English].

Отримано: 29.04.2024

Прийнято: 13.05.2024



УДК 54.08

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.16>

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА КОНСТАНТУ ДИСОЦІАЦІЇ ОЦТОВОЇ КИСЛОТИ

Р. П. Мигущенко¹, М. М. Волобуєв², І. В. Асєєва³,
О. Ю. Кропачек⁴, В. М. Балєв⁵

Дана стаття присвячена метрологічному вивченню процесу дисоціації оцтової кислоти при зміні температури в діапазоні від 20 °С до 75 °С. У ході дослідження були розглянуті методи, проведена класифікація розглянутих методів, сформульована методика експериментів. Обрана методика відображає експрес визначення водневого показника за допомогою портативного рН-метра. Концентрація робочого розчину кислоти становила 6 моль/л, з якої готували розчин з концентрацією 1 моль/л. Для вимірювань були обрані вузлові температурні точки (чотири точки в діапазоні температур 20 °С – 75 °С; сформовано 5 дослідних проб оцтової кислоти (С(НАс) = 1 моль/л); проведено аналіз результатів вимірювань у вузлових точках на точність результатів вимірювань п'яти дослідних зразків оцтової кислоти за статистичними моментами першого та другого

¹ доктор технічних наук, професор,
проректор з науково-педагогічної роботи
(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків)
e-mail: mrp1@ukr.net

ORCID: 0000-0002-3287-9772

² кандидат хімічних наук, доцент,
професор кафедри загальної неорганічної хімії
(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків)
e-mail: vmn2007@ukr.net

ORCID: 0000-0001-9779-1176

³ кандидат педагогічних наук,
старший викладач кафедри загальної та неорганічної хімії
(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків)
e-mail: aseevairina0@gmail.com

ORCID: 0000-0001-9678-2681

⁴ доктор технічних наук, професор,
професор кафедри теоретичних основ електротехніки
(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків)
e-mail: kropachek@ukr.net

ORCID: 0000-0001-5899-0252

⁵ кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем
(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків)
e-mail: bvnbn@ukr.net

ORCID: 0000-0002-6803-4739

порядку; оцінено характеристики точності експериментальних даних. Температуру зразків оцтової кислоти доводили до вузлових точок з позитивним градієнтом температури за допомогою парової бані. Оцінка похибки вимірювання визначалася класом точності приладу і становила 0.32. За отриманими значеннями рН визначали константу дисоціації. Ці визначення проводили за умови забезпечення хімічної рівноваги. Характер поведінки константи дисоціації при зміні температури досліджуваних зразків явно нелінійний.

Ключові слова: оцтова кислота, температура, рН-метрія, константа дисоціації, титрування, концентрація.

EFFECT OF TEMPERATURE ON THE DISSOCIATION COEFFICIENT OF ACETIC ACID

R. P. Mygushchenko, M. M. Volobuyev, I. V. Asieieva, O. Yu. Kropachek, V. M. Balev

This article is devoted to metrological study of acetic acid dissociation process at a temperature change in the range from 20 °C to 75 °C. The study considers methodology methods and presents their classification. The main experiments methodology is identified. The selected methods reflect the rapid determination of acidity using a portable pH meter. The concentration of working acid solution is 6 mol/l, from which a solution with a concentration of 1 mol/l is prepared. Nodal temperature points (four points in temperature range 20 °C – 75 °C) are chosen for measurements; 5 test samples of acetic acid are formed (C(HAc) = 1 mol/l); the analysis of measurements results at nodal points are carried out for the results accuracy on five experimental samples of acetic acid according to first and second order statistical moments; the characteristics of experimental data accuracy are evaluated. Acetic acid samples are brought to nodal points with a positive temperature gradient using a steam bath. The measurement error estimate is determined by the device accuracy class and is 0.32. The dissociation constant is determined from the obtained pH values. These determinations are carried out under condition of ensuring chemical equilibrium. The nature of dissociation constant temperature dependency is clearly non-linear.

Key words: acetic acid, temperature, pH metry, dissociation constant, titration, concentration.

Вступ

Оцтова (етанова) кислота CH_3COOH – це безбарвна рідина з різким характерним запахом. Є однією з самих розповсюджених хімічних речовин на виробництві та у побуті. Використання цієї кислоти саме різноманітне. У хімічній промисловості з її застосуванням виробляють ацетон, пластичні маси, фарбники, штучне волокно і т.п. В харчовій промисловості оцтова кислота – це консервант, регулятор кислотності і харчова добавка. Солі оцтової кислоти застосовують як засоби для боротьби із шкідниками й хворобами рослин, стимуляторами росту, використовують для первинного протравлення при фарбуванні тканин. Оцтова кислота має широке застосування як розчинник (Ластов'як та ін., 2004).

У водному розчині оцтова кислота розпадається на катіон H^+ і аніон CH_3COO^- : $\text{CH}_3\text{COOH} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{CH}_3\text{COO}^-$, а константа дисоціації (Jankovic et al., 2010) K_a визначається як:

$$K_a = \frac{[\text{H}^+] \times [\text{CH}_3\text{COO}^-]}{[\text{CH}_3\text{COOH}]} \quad (1)$$

Деякі характеристики оцтової кислоти наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики оцтової кислоти

Характеристики	Показники
молекулярна маса	60.053 г/моль
зовнішній вигляд	прозора рідина
густина	1.0446 г/см ³
температура плавлення	16.635 °C
температура кипіння	117.87 °C
розчинність	легко розчиняється у воді
pK _a	4.756
діелектрична проникність	6.20

Одержання оцтової кислоти CH_3COOH здійснюється переважно методом ферментації, а для отримання чистої кислоти у великих масштабах застосовуються методи карбонілювання метанолу, окислення бутану і етанолу. Основним промисловим методом є одержання кислоти з метанолу.

Вплив температури на властивості оцтової кислоти на даний момент погано вивчений. Відомо лише, що при підвищенні температури оцтової кислоти до 110 °С гинуть оцтовокислі бактерії, сторонні мікроорганізми, а також виділяється їдка пара.

Дані дослідження присвячені кореляції константи дисоціації K_a (1) і температури навколишнього середовища.

Матеріал і методи

Існує декілька методів визначення константи дисоціації K_a (Catherine & Housecroft, 2018). Розповсюджений метод ґрунтується на побудові кривої титрування як залежності pH розчину від об'єму титранту NaOH. У цьому методі, на кривій титрування визначається «стрибок», вимірюється координата «стрибка» по осі абсцис, координата «стрибка» поділяється на два і по цій координаті на кривій титрування визначається pH (Ghosh et al., 2022), як координата на осі ординат. Через отримане значення pH визначається константа дисоціації за формулою:

$$K_a = 10^{-pH}, \quad (1)$$

Для дослідження впливу температури на NaOH представлений метод не може бути застосований, оскільки:

- підігріта оцтова кислота об'ємом 1 мл дуже швидко охолоджується (тому зафіксувати температуру кислоти дуже важко);
- для фіксації температури на визначеному рівні необхідно підігрівати і розчин NaOH до такої ж температури (виконати цю процедуру неможливо, оскільки розчин NaOH знаходиться в бюретці);
- через малі об'єми рідин при титруванні (1 мл кислоти і 2–12 мл NaOH) неможливо скористатись рН-метром (для мінімізації похибки вимірювань зонд повинен бути повністю занурений у рідину);
- чутливість методу по визначенню pH є дуже низькою, що призводить до величезних похибок (згідно експериментальних даних).

Тому визначення впливу температури на K_a досліджувалось на основі побудови залежності pH розчину від температури (Xiong et al., 2021). Після отримання такої залежності K_a визначалася за формулою (1), яка трансформована у формулу 2:

$$K_a = \frac{10^{-2pH}}{C_0 - 10^{-pH}}, \quad (2)$$

де NaOH – початкова концентрація оцтової кислоти.

Формула (2) застосовується у точці еквівалентності при титруванні оцтової кислоти лугом NaOH. Так як початкова концентрація оцтової кислоти C_0 не залежить від температури, то її доцільно визначати за допомогою титрування в звичайних лабораторних умовах при кімнатній температурі.

Таким чином, метою даних досліджень є визначення впливу температури на константу дисоціації оцтової кислоти. Для досягнення мети необхідно провести дві групи експериментів:

– визначення pH розчину оцтової кислоти об'ємом 60 мл у чотирьох вузлових точках – 20 °С, 35 °С, 50 °С, 75 °С за допомогою рН-метра;

– визначення початкової концентрації оцтової кислоти C_0 методом титрування (Kumar, 2013).

Для експериментів по визначенню впливу температури на рН використовується: електрична піч, парова баня, рН-метр, термометр від 0 °С до 100 °С, два хімічних стакани об'ємом 200 мл, мірний стакан об'ємом 100 мл, хімічна піпетка, розчин оцтової кислоти концентрації ≈ 1 моль/л, дистильована вода (Пономарьова, 2022).

Для експериментів по визначенню початкової концентрації оцтової кислоти методом титрування необхідні: хімічна колба об'ємом 200 мл, мірний стакан об'ємом 50 мл, хімічна піпетка, бюретка об'ємом 50 мл, розчин оцтової кислоти концентрації ≈ 1 моль/л, дистильована вода, стандартизований розчин луку NaOH концентрації 0.1 моль/л, індикатор фенолфталеїн (Сухан та ін., 2022).

Результати та обговорення

Результати визначення впливу температури на pH розчину наведені в табл. 2. (Wang et al., 2019). Результати визначення початкової концентрації C_0 оцтової кислоти наведені в табл. 2.

Таблиця 2
Значення pH розчину оцтової кислоти при різних температурах

Проба	t_1 (20 °С)	t_2 (35 °С)	t_3 (50 °С)	t_4 (75 °С)
1	2.1	2.1	1.8	1.6
2	2.0	1.8	1.7	1.3
3	2.1	1.9	1.8	1.1
4	2.0	1.9	1.7	1.1
5	2.1	1.8	1.5	1.0

В табл. 3 наведені показники об'єму оцтової кислоти V_{κ} , яка використовувалась в експериментах, концентрації C_{λ} та об'єму V_{λ} розчину NaOH. Вибір п'яти проб для експериментів дозволяє здійснювати вимірювання шляхом багатократних спостережень, а це, в свою чергу, підвищує точність результату (Іщенко, 2023).

Таблиця 3

Дані титрування

Проба	V_{κ} , мл	C_{λ} , моль/л	V_{λ} , мл
1	1	0.1	10.1
2	1	0.1	10.0
3	1	0.1	10.2
4	1	0.1	9.8
5	1	0.1	9.9

За даними табл. 2 побудована графічна залежність pH розчину оцтової кислоти від температури $pH = f(t)$ (рис. 1).

Відповідно до табл. 3, середні значення об'єму луку в експерименті $V_{\lambda} = 10$ мл. Наявність даних табл. 2 дозволяє отримати середні значення (математичне сподівання M) і розподіл даних відносно середніх значень (дисперсія D) (Защепкіна та ін., 2021).

Середні значення і розподіл даних відносно середніх значень визначаються за формулами:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n pH_i}{n}, \quad (3)$$

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (pH_i - M)^2}{n-1}, \quad (4)$$

де n – кількість проб.

Математичне сподівання і дисперсія для даних табл. 2 представлені в табл. 4.

Таблиця 4

Середні значення і розподіл даних

Дані	t_1 (20 °C)	t_2 (35 °C)	t_3 (50 °C)	t_4 (75 °C)
M	2.06	1.90	1.70	1.22
D	0.003	0.015	0.015	0.057

Одержані дані дозволяють оцінити загальну тенденцію зміни показників оцтової кислоти при зміні температури, оцінити лінійність характеристик, достовірність результатів при разовому вимірюванні за допомогою рН-метра (Garcia-Garcia et al., 2009). Здійснено розрахунок значень C_0 за формулою (2) у вузлових точках (20 °C, 35 °C, 50 °C, 75 °C). Визначення C_0 у відповідності до (2), здійснюється в умовах рівноваги в точці еквівалентності:

$$C_0 \cdot V_{\kappa} = C_{\lambda} \cdot V_{\lambda}, \quad (5)$$

де C_0 – концентрація кислоти;
 V_{κ} – об'єм кислоти;
 C_{λ} – концентрація луку;
 V_{λ} – об'єм луку.

На основі формули (5) визначається значення початкової концентрації оцтової кислоти C_0 :

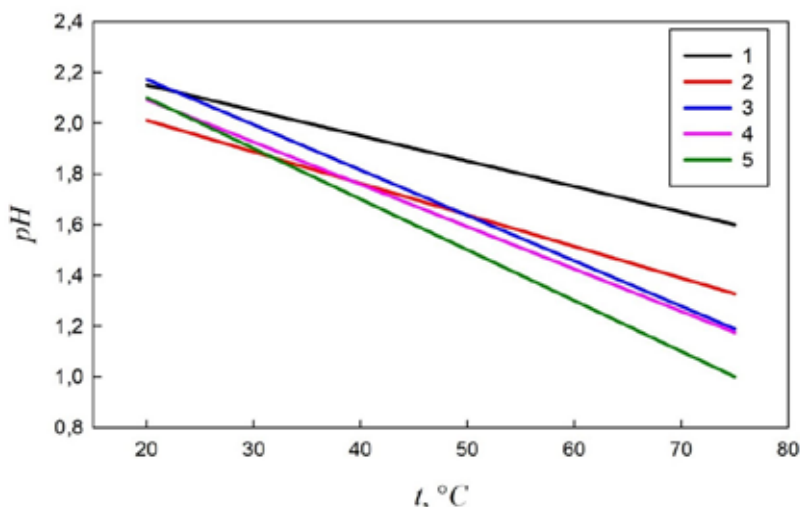


Рис. 1. Залежність $pH = f(t)$ для досліджених зразків: 1 – проба 1; 2 – проба 2; 3 – проба 3; 4 – проба 4; 5 – проба 5

$$C_0 = \frac{C_l \cdot V_l}{V_k} \quad (6)$$

Значення C_0 визначене на основі даних табл. 3 і формули (6) дорівнює $C_0 = 1.0$ моль/л. Значення K_a у вузлових точках (20 °C, 35 °C, 50 °C, 75 °C), які визначені на основі формули (2), наведені в табл. 5.

Таблиця 5

Значення K_a при різних температурах

t, °C	20	35	50	75
C_0	1.0	1.0	1.0	1.0
K_a	0.00007	0.00016	0.00041	0.00386

Проміжні значення для розрахунку даних табл. 5 наведені в табл. 6.

Таблиця 6

Проміжні значення для розрахунку K_a при різних температурах

t, °C	20	35	50	75
10^{-2pH}	0.00007	0.00016	0.00040	0.00363
10^{-pH}	0.00812	0.01259	0.01995	0.06026
$C_0 - 10^{-2pH}$	0.99188	0.98741	0.98005	0.93974

На основі даних табл. 5, 6 побудована графічна залежність $K_a = f(t)$ (рис. 2) значення константи дисоціації оцтової кислоти K_a (Amador et al., 2020) від температури розчину в діапазоні 20 °C – 75 °C.

Принциповим питанням експериментів і подальшої верифікації отриманих даних є аналіз похибок вимірювання (Тичков та ін., 2021). Розрахунок похибки початкової концентрації оцтової кислоти C_0 , виходячи з (7), визначаються за формулою

$$\Delta C_0^2 = \left(\frac{dC_0}{dC_l} \cdot \Delta C_l \right)^2 + \left(\frac{dC_0}{dV_l} \cdot \Delta V_l \right)^2 + \left(\frac{dC_0}{dV_k} \cdot \Delta V_k \right)^2 \quad (7)$$

ΔC_l – відповідає похибці стандартизованого NaOH і дорівнює 0.01 моль/л;

ΔV_l – відповідає класу точності бюретки і дорівнює 0.1 мл;

ΔV_k – відповідає класу точності хімічної піпетки і дорівнює 0.3 мл;

$\frac{dC_0}{dC_l}$, $\frac{dC_0}{dV_l}$, $\frac{dC_0}{dV_k}$ – вагові коефіцієнти.

При переході від похідних до прирощень, а також при визначенні виразів для конкретних вагових коефіцієнтів (Mugushchenko et al., 2023), формула (7) перетворюється в формулу для визначення похибки вимірювання C_0 :

$$\Delta C_0 = \sqrt{\left(\frac{V_l}{V_k} \Delta C_l \right)^2 + \left(\frac{C_l}{V_k} \Delta V_l \right)^2 + \left(\frac{C_l V_l}{V_k^2} \Delta V_k \right)^2} \quad (8)$$

Підставляючи в (8) значення похибки стандартизації, бюретки, хімічної піпетки, а також даних C_l , V_l , V_k (табл. 3 і формула (3)), розрахована похибка становить $\Delta C_0 = 0.3$ моль/л:

$$\Delta C_0 = \sqrt{\left(\frac{10}{1} \cdot 0.01 \right)^2 + \left(\frac{0.1}{1} \cdot 0.1 \right)^2 + \left(\frac{0.1 \cdot 10}{1^2} \cdot 0.3 \right)^2}$$

Оцінка похибки визначення K_a у вузлових температурних точках здійснена за формулою (2). Похибка K_a , відповідно до формули (2), залежить від класу точності рН-метра ($\Delta_{pH} = 0.1$) і похибки визначення початкової концентрації оцтової кислоти C_0 ($\Delta C_0 = 0.3$ моль/л).

Для оцінки похибки ΔK_a доцільно використовувати формулу:

$$\Delta K_a = \sqrt{\Delta_{pH}^2 + \Delta C_0^2} \quad (9)$$

Відповідно до (9), $\Delta K_a = 0.32$.

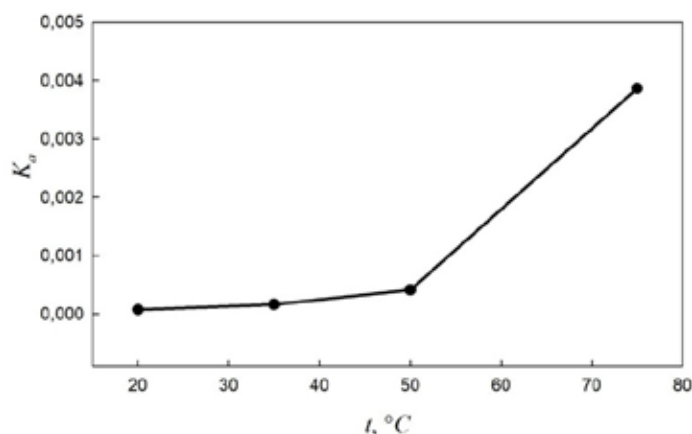


Рис. 2. Залежність $K_a = f(t)$

Висновки

1. Проведені дослідження впливу температури на коефіцієнт дисоціації K_a оцтової кислоти у ході двох груп експериментів. Перша група з використанням експрес-метода вимірювання pH оцтової кислоти за допомогою портативного pH -метра дозволила оцінити вплив температури на pH розчину кислоти. На основі залежності константи дисоціації K_a від температури здійснено розрахунок K_a враховуючи значення pH при відомій початковій концентрації оцтової кислоти C_0 за умови рівноваги.

2. З метою визначення початкової концентрації оцтової кислоти C_0 , проведена друга група експериментів за допомогою титриметричного аналізу. Реалізація методу титрування на практиці використовує базове лінійне рівняння (6) з трьома параметрами. Два параметри з трьох (V_k ,

V_n) визначаються відповідними вимірюваннями об'єму, третій (C_n) – використовує стандартизований луг $NaOH$. Використання даного методу спирається на формули (2) і (7), а значить, здійснюється реалізація непрямих вимірювань, що впливає на точність, оскільки виконується додавання (арифметичне, алгебраїчне, геометричне) похибок окремих складових формули. Нелінійний характер залежності $K_a f(t)$ легко виправляється внесенням коректувальних схем (двохполюсників, чотирьохполюсників) в електронну систему pH -метра. Таким чином можлива температурна корекція пристрою вимірювання.

3. Дисоціація оцтової кислоти зростає зі збільшенням температури. Залежність константи дисоціації K_a оцтової кислоти від температур має нелінійний характер, що може бути описано експоненційною залежністю.

Список використаної літератури

- Защепкіна Н. М., Шульга О. В., Наконечний О. А. Метрологічне забезпечення інформаційно-вимірювальних систем : навч. посіб. Київ : Вид-во КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 176 с.
- Іщенко М.В. Забезпечення і контроль якості аналізу : навч. посіб. Київ, 2023. 73 с.
- Ластов'як Я.В. Караман Н.С., Полутаренко М.С., Паздерський Ю.А. Оцтова кислота. Властивості, використання, виробництво : монографія. Львів : Вид-во НУ «Львів Політехніка», 2004. 166 с.
- Пономарьова В.В. Основи хімії: навчальний посібник. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2022. 160 с.
- Сухан В.В., Трохименко О.М., Трохименко А.Ю. Аналітичні реагенти й техніка приготування їхніх розчинів: підручник. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2022. 592 с.
- Тичков В.В., Гальченко В.Я., Трємбовецька Р.В. Метрологічне забезпечення фізико-хімічних вимірювань: навч.-метод. посіб. Черкаси, 2021. 253 с.
- Amador C., Wencheng F. Liu, Mina C. Johnson-Glenberg, Likamwa R. Work-in-Progress – Titration Experiment: Virtual Reality Chemistry Lab with Haptic Burette. *Proceedings of 6th International Conference of the Immersive Learning Research Network*. 2020. P. 363–365.
- Catherine E., Housecroft, Alan G. Sharpe. *Inorganic Chemistry (5-th ed.)*. Pearson Education Limited. 2018. 1296 p.
- García-García S., Wold S., Jonsson M. Effects of temperature on the stability of colloidal montmorillonite particles at different pH and ionic strength. *Appl. Clay Sci.* 2009. Vol. 43 (1). P. 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.07.011>.
- Ghosh D., Chakraborty K., Bharti B., Pulimi M., Anand S., Chandrasekaran N., Kumar Rai P., Swapna Singha Rabha C., Mukherjee A. The effects of pH, ionic strength, and natural organics on the transport properties of carbon nanotubes in saturated porous medium. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2022. Vol. 647. P. 129025. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129025>.
- Jankovic M., Sinadinovic-Fisher S., Lamshoef M. Liquid-Liquid Equilibrium Constant for Acetic Acid in an Epoxidized Soybean Oil-Acetic Acid-Water System. *Journal of JAOCS*. 2010. Vol. 87 (5). P. 591–600. <https://doi.org/10.1007/s11746-009-1531-z>.
- Kumar A., Galal M. Zaiad. Spectrophotometric determination of dissociation quotients of triazene – N^1 – oxides and the effect of substituents on pKa values. *Sci. Res. J.* 2013. Vol. I (IV). P. 56–59.
- Mygushchenko R., Kropachek O., Suchkov H., Korzhov I., Asieieva I., Mygushchenko K. Algorithmic support of the automatic identification device for industrial units nodes, 2023 *IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2023. P. 186–193. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023>.

Wang Y., Yang K., Chefetz B., Xing B., Lin, D. Te pH and concentration dependent interfacial interaction and heteroaggregation between nanoparticulate zero-valent iron and clay mineral particles. *Environ. Sci. Nano*. 2019. Vol.7. P. 2129–2140. <https://doi.org/10.1039/C9EN00433E>.

Xiong Y., Liu X., Xiong H. Aggregation modeling of the influence of pH on the aggregation of variably charged nanoparticles. *Sci. Rep.* 2021. Vol. 11. P. 17386. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96798-3>.

References (translated & transliterated)

Zashchepkina, N.M., Shulha, O.V., & Nakonechnyi, O.A. (2021). Metrolohichne zabezpechennia informatsiino-vymiriuvalnykh system: navch. posib. [Metrological support of information and measurement systems: training. manual]. Kyiv : Vyd-vo KPI im. Ihoria Sikorskoho [in Ukrainian].

Ishchenko, M.V. (2023). Zabezpechennia i kontrol yakosti analizu: navch. posib. [Ensuring and controlling the quality of analysis: teacher manual]. Kyiv [in Ukrainian].

Lastoviak, Ya.V., Karaman, N.S., Polutarenko, M.S., & Pazderskyi, Yu.A. (2004). Otvstova kyslota. Vlastyvosti, vykorystannia, vyrobnytstvo: monohrafiia [Acetic acid. Properties, use, production: monograph]. Lviv: Vydavnytvo Lviv Polytechnic National University [in Ukrainian].

Ponomarova, V.V. (2022). Osnovy khimii: navchalnyi posibnyk [The basics of chemistry: a study guide]. Kyiv : Publishiing center “Kyiv university” [in Ukrainian].

Sukhan, V.V., Trokhymenko, O.M., & Trokhymenko, A.Yu. (2022). Analitychni reahenty y tekhnika pryhotuvannia yikhnykh rozchyniv: pidruchnyk [Analytical reagents and the technique of preparing their solutions: a textbook]. Kyiv: Publishiing center “Kyiv university” [in Ukrainian].

Tychkov, V.V., Halchenko, V.Ya., & Trembovetska, R.V. (2021). Metrolohichne zabezpechennia fizyko-khimichnykh vymiriuvan: navch.-metod. posib. [Metrological support of physical and chemical measurements: educat. and method. manual]. Cherkasy [in Ukrainian].

Amador, C., Wencheng, F. Liu, Mina, C. Johnson-Glenberg, & Likamwa, R. (2020). Work-in-Progress – Titration Experiment: Virtual Reality Chemistry Lab with Haptic Burette. *Proceedings of 6th International Conference of the Immersive Learning Research Network*, 363–365 [in English].

Catherine, E., Housecroft, & Alan, G. Sharpe (2018). Inorganic Chemistry (5-th ed.). *Pearson Education Limited*, 1296 [in English].

García-García, S., Wold, S., & Jonsson, M. (2009). Effects of temperature on the stability of colloidal montmorillonite particles at diferent pH and ionic strength. *Appl. Clay Sci.*, 43 (1), 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.07.011> [in English].

Ghosh, D., Chakraborty, K., Bharti, Pulimi, M., Anand, S., Chandrasekaran N., Kumar Rai, P., Swapna Singha, Rabha, & A. Mukherjee (2022). The effects of pH, ionic strength, and natural organics on the transport properties of carbon nanotubes in saturated porous medium. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.*, 647, 129025. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129025> [in English].

Jankovic, M., Sinadinovic-Fisher, S., & Lamshoef, M. (2010). Liquid-Liquid Equilibrium Constant for Acetic Acid in an Epoxidized Soybean Oil-Acetic Acid-Water System. *Journal of JAOCS*, 87 (5), 591–600. <https://doi.org/10.1007/s11746-009-1531-z> [in English].

Kumar, A., & Galal M, Zaiad (2013). Spectrophotometric determination of dissociation quotients of triazene – N¹ – oxides and the effect of substituents on pKa values. *Sci. Res. J.*, I (IV), 56–59 [in English].

Mygushchenko, R., Kropachek, O., Suchkov, H., Korzhov, I., Asieieva, I., & Mygushchenko, K. (2023). Algorithmic support of the automatic identification device for industrial units nodes, *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 186–193. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023> [in English].

Wang, Y., Yang, K., Chefetz, B., Xing, B., & Lin, D. (2019). The pH and concentration dependent interfacial interaction and heteroaggregation between nanoparticulate zero-valent iron and clay mineral particles. *Environ. Sci. Nano*, 7, 2129–2140. <https://doi.org/10.1039/C9EN00433E> [in English].

Xiong, Y., Liu, X., & Xiong, H. (2021). Aggregation modeling of the influence of pH on the aggregation of variably charged nanoparticles. *Sci. Rep.*, 11, 17386. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96798-3> [in English].

Отримано: 05.04.2024
Прийнято: 17.04.2024



УДК 552.576.1:661.183.03:554.723.2
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.17>

НАНОПОРИСТІ МАТЕРІАЛИ З ДОВГОПОЛУМЕНЕВОГО ВУГІЛЛЯ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ВІД БАРВНИКА МЕТИЛЕНОВОГО БЛАКИТНОГО

А. В. Редько¹, Ю. В. Тамаркіна², В. О. Кучеренко³

Розвиток промисловості призвів до забруднення води барвниками, які є екотоксикантами через канцерогенну і мутагенну активність та негативний вплив на фотосинтез. Ефективним методом очищення води є адсорбція нанопористими вуглецевими матеріалами (ВМ) з високою питомою поверхнею ($\geq 2000 \text{ м}^2/\text{г}$). Такі ВМ отримують термохемолізом викопного вугілля з КОН при великих співвідношеннях КОН/вугілля (3–7 г/г), що технологічно та екологічно не прийнятно. Тому є актуальними дослідження, орієнтовані на синтез ВМ при малих витратах луку ($\leq 1 \text{ г/г}$) та дослідження їх здатності уловлювати органічні сполуки з води.

Мета даної роботи – вивчити перетворення довгополуменевого вугілля у ВМ, яке обумовлено підвищенням температури лужного термохемолізу, та оцінити її вплив на адсорбційну активність ВМ по відношенню до метиленового блакитного (МБ). МБ обрано як типовий забруднювальний барвник для кількісної оцінки поглинальної здатності нових ВМ.

Зразки ВМ отримували нагріванням вугілля з КОН до заданої температури в межах $t=350\text{--}825^\circ\text{C}$ та витримкою 1 год. За ізотермами (77 К) адсорбції-десорбції азоту розраховано (метод 2D-NLDFT-HS, програма SAIEUS) загальний об'єм пор V_p , питому поверхню S_{DFP} , об'єми та поверхню ультрамікропор (V_{umi} , S_{umi}), супермікропор (V_{smi} , S_{smi}), мікропор (V_{mi} , S_{mi}) та мезо-і макропор ($V_{\text{me+ma}}$, $S_{\text{me+ma}}$). Позначення пор та їх середні діаметри (D) прийнято за рекомендаціями IUPAC.

Встановлено, що температура лужного термохемолізу визначає пористість та адсорбційну ємність за МБ. Найбільша питома поверхня (1514–1530 $\text{м}^2/\text{г}$) та ємність (189–204 мг/г) при-таманна ВМ, отриманим при 785–825 $^\circ\text{C}$. На основі температурних залежностей об'єму пор та питомої поверхні виявлено збільшення величин V_{umi} , V_{smi} , S_{umi} та S_{smi} з ростом температури

¹ провідний інженер відділу хімії вугілля
(Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України, м. Київ)
e-mail: redkoav0@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9768-4020

² кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник,
старший науковий співробітник відділу досліджень нуклеофільних реакцій
(Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України, м. Київ)
e-mail: ytamarkina@gmail.com
ORCID: 0000-0002-8747-4481

³ доктор хімічних наук, старший науковий співробітник,
завідувач відділу хімії вугілля
(Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України, м. Київ)
e-mail: v.a.kucherenko@ukr.net
ORCID: 0000-0001-7234-947X

до 600 °С. За більш високих температур об'єм V_{umi} знижується, оскільки ультрамікропори ($D \leq 0,7$ нм) трансформуються в супермікропори ($D = 0,7 - 2,0$ нм). Кінетика адсорбції МБ (25 °С) підпорядковується моделі псевдо-другого порядку; адсорбційна рівновага досягається за ~3 год. Стадією, яка визначає швидкість адсорбції, є взаємодія молекул МБ з поверхневими адсорбційними центрами (АЦ). Ізотерми адсорбції найкраще описуються моделлю Ленгмюра. Встановлено низьку активність ВМ, отриманих при 350–600 °С: ємність варіюється у вузьких межах (14–38 мг/г), хоча питома поверхня збільшується з 11 м²/г до ~1000 м²/г. При зростанні S_{DFT} до ~900 м²/г ємність за МБ майже постійна, отже в цій області додаткові АЦ практично не утворюються або просторово недоступні. Для ВМ з поверхнею $S_{DFT} > 900$ м²/г формування АЦ пропорційне зростанню S_{DFT} . Встановлено, що головні чинники, які зумовлюють адсорбційну активність ВМ, є об'ємне заповнення мезопор та π - π взаємодія МБ з поліареновим фрагментом ВМ. Кислотні функційні групи не відіграють істотної ролі в поглинанні МБ внаслідок їх розміщення на поверхні мікропор, які є малодоступними для молекул барвника.

Ключові слова: довгополуменеве вугілля, лужний термохімічний розклад, вуглецевий матеріал, нанопористість, адсорбція, метиленовий блакитний.

NANOPOROUS MATERIALS FROM LONG-FLAME COAL FOR PURIFYING WATER FROM METHYLENE BLUE DYE

V. Redko, Ju. V. Tamarkina, O. V. Kucherenko

Industrial development has led to water pollution with dyes being ecotoxicants due to carcinogenic and mutagenic activity and a negative effect on photosynthesis. An effective method of water purification is adsorption by nanoporous carbon materials (CM) with a high specific surface area (≥ 2000 m²/g). Such CMs are obtained by thermochemolysis of coals with KOH at high KOH/coal ratios (3–7 g/g), which is technologically and environmentally unacceptable. Therefore, research focused on the synthesis of CMs at low alkali ratios (≤ 1 g/g) and the study of CMs ability to capture organic compounds from water are relevant.

The purpose of this work is to study the transformation of long-flame coal into CMs, caused by an increase in the temperature of alkaline thermochemolysis, and to evaluate its effect on the CMs adsorption activity towards methylene blue (MB). MB is selected as a representative contaminant dye to quantify the adsorption capacity of new CMs.

The CM samples were obtained by heating coal from KOH to a given temperature in the range $t=350$ – 825 °C and holding for 1 h. Based on nitrogen adsorption-desorption isotherms (77 K), it was calculated (2D-NLDFT-NS method, SAIEUS program) the total pore volume V_p , specific surface area S_{DFT} , volumes and surface area of ultramicropores (V_{umi} , S_{umi}), supermicropores (V_{smi} , S_{smi}), micropores (V_{mi} , S_{mi}) and meso- and macropores (V_{me+ma} , S_{me+ma}). The designations of pores and their average diameters (D) are accepted on IUPAC recommendation.

The alkaline thermochemolysis temperature was established to determine the porosity and the MB adsorption capacity. The highest specific surface areas (1514–1530 m²/g) and capacities (189–204 mg/g) are characteristics of CMs prepared at 785–825°C. Based on the temperature dependences of the pore volume and specific surface, an increase in the values of V_{umi} , V_{smi} , S_{mi} and S_{smi} was revealed up to 600°C. At higher temperatures, the volume V_{umi} decreases due to transforming ultramicropores ($D \leq 0.7$ nm) into supermicropores ($D = 0.7$ – 2.0 nm). The kinetics of MB adsorption (25°C) follows the pseudo-second order model; adsorption equilibrium is achieved for ~3 h. The rate determining stage is the interaction of MB molecules with surface adsorption centers (ACs). Adsorption isotherms are best described by the Langmuir model. The activity of CMs prepared at 350–600°C was established to be low. Its capacities vary at narrow intervals (14–38 mg/g), although the surface increases from 11 m²/g to ~1000 m²/g. As S_{DFT} increases to ~900 m²/g, the MB capacity is almost constant, so that in this region additional ACs are practically not formed or are spatially inaccessible. For CMs with a surface $S_{DFT} > 900$ m²/g, the formation of ACs is proportional to the S_{DFT} growth. The main factors determining the CMs adsorption activity were established to be the mesopores filling and the π - π interaction of MB with the polyarene fragment of CM. Acidic functional groups do not play a significant role in the absorption of MB due to their location on the micropores surface being inaccessible to dye molecules.

Key words: long-flame coal, alkaline thermochemolysis, carbon material, nanoporosity, adsorption, methylene blue.

Вступ

Розвиток промисловості призвів до багатьох екологічних проблем, зокрема забруднення води та ґрунту. Одним з типів забруднюючих речовин є органічні барвники, річне виробництво яких оцінюється в $\sim 7 \cdot 10^5$ тон (Oladoye et al., 2022). Вони застосовуються при виробництві шкіри, харчових продуктів, фарб, тканин та багатьох інших технічних продуктів. У процесі фарбування використовується лише 5% барвників, а решта утилізується в наступних технологічних циклах, що уможливає їх потрапляння в навколишнє середовище (Zhang et al., 2021). Метиленовий блакитний (МБ) – катіонний барвник, який використовується найбільш широко (Ramutshatsha-Makhwedzha et al., 2022; Li et al., 2022). Він є потенційним екотоксикантом через високу токсичність, канцерогенну і мутагенну активність, екологічну стійкість, стійкість до біорозкладання та сонячного випромінювання (Oladoye et al., 2022), а також через негативний вплив на фотосинтез в екосистемах (Ramutshatsha-Makhwedzha et al., 2022).

Серед безлічі методів очищення стічних вод від МБ (мембранна фільтрація, коагуляція, електроліз, анаеробний гідроліз, окисеструкція) адсорбція є найбільш перспективним методом з точки зору ефективності та вартості (Zhang et al., 2021). Поширеними адсорбентами для уловлювання МБ, поряд з іншими органічними барвниками, є вуглецеві матеріали (ВМ) з розвиненою пористою структурою. Окрему групу складають ВМ, які отримано лужною активацією – термохемолізом органічної сировини з гідроксидом калію в інертному газовому середовищі (N_2 , Ar). Процес здатен перетворити на ВМ будь-яку тверду органічну речовину, зокрема, викопне вугілля (Zhao et al., 2023), полімери (Tiwari et al., 2018), різноманітні види біомаси та відходів (Gayathiri et al., 2022). Тільки цей процес дозволяє отримувати матеріали з питомою площею поверхні (S) в межах $S = 3000\text{--}4500$ м²/г. Описано такі ВМ з бурого вугілля ($S = 3036$ м²/г) (Xing et al., 2015), кам'яновугільного пеку ($S = 3145$ м²/г) (Wei et al., 2019), бітуму ($S = 3851$ м²/г) (Javed et al., 2018), антрациту ($S \leq 4012$ м²/г) (Namyali et al., 2022), карбамід-формальдегідної смоли ($S = 4547$ м²/г) (Tiwari et al., 2018) та інших речовин. Сьогодні дослідницькі акценти зміщені на вивчення ВМ з різноманітних видів біомаси, головним чином органічних відходів

переробки сільськогосподарської продукції (Gayathiri et al., 2022). Але при використанні біомаси як вихідної сировини зазвичай отримують ВМ з невеликими виходами ($\leq 20\%$), оскільки вони містять мало вуглецю та багато кисню, участь якого у формуванні просторового каркасу ВМ невелика. Це потребує додаткових технологічних операцій збагачення, зокрема карбонізації при $200\text{--}500$ °С для отримання карбонітата, тобто збагаченого вуглецем продукту (Seow et al., 2022).

У той самий час, вже є природні речовини, збагачені вуглецем. Це викопне вугілля різного ступеня метаморфізму з вмістом вуглецю від 70 до 97%. Їхня переробка не потребує спеціальних підготовчих операцій і вони можуть бути активовані безпосередньо після видобутку та подрібнення. До того ж, при певних умовах лужного термохемолізу вони утворюють вуглецеві матеріали з надзвичайно високою питомою поверхнею ($3000\text{--}4012$ м²/г) (Xing et al., 2015; Namyali et al., 2022). Додатково перевагою є те, що викопне вугілля як сировина розташована компактно. З цих причин дослідження перетворення вугілля у ВМ та визначення їх адсорбційних властивостей є актуальним.

Різнорманітні за походженням ВМ істотно розрізняються за величинами максимальної адсорбційної ємності ($A_{\text{МБ(м)}}$) зацією сполукою. За даними робіт (Mbarki et al., 2022; Jasri et al., 2023) більшість ВМ мають значення $A_{\text{МБ(м)}}$ в межах $A_{\text{МБ(м)}} = 6.8\text{--}826$ мг/г. У той же час отримано матеріали зі значно більшою адсорбційною активністю. Повідомлено (Yu et al., 2019) про ВМ ($S = 3291$ м²/г) з ємністю $A_{\text{МБ(м)}} = 1352$ мг/г, який синтезовано з карбонізованих зерен кукурудзи (450 °С, 1 год) з наступним лужним термохемолізом з NaOH (4 г/г). Описано (Li et al., 2021) зразки ВМ ($S = 1814\text{--}2015$ м²/г) з високою ємністю ($A_{\text{МБ(м)}} = 1758\text{--}2251$ мг/г), отримані карбонізацією суміші лушпиння рису та кукурудзи (450 °С, 1 год) з наступним термохемолізом з KOH (3 г/г). Ймовірно, найбільше значення $A_{\text{МБ(м)}} = 4181,2$ мг/г наведено в роботі для ВМ ($S = 4482$ м²/г), отриманих з карбонізованих листя лотоса, термолізованих з KOH (4 г/г) (Liu et al., 2020). Такі «рекордні» значення питомої поверхні та адсорбційної ємності виявляють ВМ, утворені при великих співвідношеннях луг/субстрат (≤ 7 г/г), що робить процес їх отримання непривабливим з екологічної та технологічної точок зору.

Перспективними адсорбентами є ВМ з викопного вугілля, активованого лугом при невеликому ваговому співвідношенні КОН/вугілля (1 г/г). Вони також здатні поглинати органічні сполуки з водних середовищ (Тамаркіна та ін., 2020) та можуть бути ефективними адсорбентами в процесах очищення води від екоотоксикантів.

Раніше встановлено характеристики пористої структури зразків ВМ, отриманих лужною активацією ($R_{\text{КОН}} = 1$ г/г, 800 °С) викопного вугілля різного ступеня метаморфізму з вмістом вуглецю в межах $C^{\text{daf}} = 70,4 - 95,6$ % (Тамаркіна та ін., 2020). Матеріали з найбільш розвиненою пористістю та максимальною адсорбційною ємністю за різними адсорбатами (фенол, 4-хлорфенол, йод) утворюються з кам'яного вугілля низького ступеня метаморфізму $C^{\text{daf}} = 80-81\%$, що відповідає довгополуменому вугіллю марки Д. Ці зразки вугілля утворюють ВМ з $S \geq 1500$ м²/г, що є високими значеннями для матеріалів, отриманих при малих співвідношеннях $R_{\text{КОН}}$.

Мета даної роботи – вивчити перетворення довгополуменового вугілля у ВМ, яке обумовлено підвищенням температури лужного термомолізу, та оцінити її вплив на адсорбційну активність ВМ по відношенню до МБ.

Матеріал і методи

Дослідження виконано на зразку довгополуменового вугілля (пласт з геологічним індексом k_8) з розміром частинок 0,16–0,25 мм, аналітичною вологістю $W^a = 10,9\%$, зольністю $A^d = 1,8\%$ та виходом летких продуктів $V^{\text{daf}} = 44,8\%$. Елементний склад органічної вугільної речовини (% daf): С 78,6; Н 5,5; N 1,9; S 1,2; О 12,8 (за різницею).

Імпрегнування вугілля гідроксидом калію виконували в три стадії: 1) змішування 10 г висушеного вугілля і 33,3 г водного розчину КОН (30%) для забезпечення співвідношення $R_{\text{КОН}} = 1,0$ г/г; 2) витримку 24 год при 20–30 °С; 3) видалення водної фази при 90–100 °С та залишкової води при 120±10 °С (120±10 °С, ≥2 год).

Зразки ВМ отримували термопрограмованим (4 град/хв) нагріванням імпрегнованого вугілля (~40 г) в потоці аргону до заданої температури t , ізотермічно витримкою 1 год при температурі t та охолодженням до $t \leq 50$ °С. Утворений вуглецевий продукт послідовно відмивали від сполук калію (в основному КОН, KHCO_3 , K_2CO_3) водою, розчином HCl (0.1М) і водою до зникнення іонів Cl^- у промивних водах (за якісною реакцією з AgNO_3), потім сушили (120±5 °С) до постій-

ної ваги і визначали вихід Y (%). Похибка визначення виходу ВМ становить ±2%. Синтезовані за різних температур зразки позначено $\text{VM}(t)$, наприклад, $\text{VM}(800)$ – зразок, отриманий при $t = 800$ °С.

Елементний склад ВМ визначено аналізатором Carlo Erba 1106. Вміст кислотних функційних груп [КФГ] (ммоль/г), тобто суми карбоксильних та фенольних груп, визначено титруванням бікарбонатом та гідроксидом натрію по Бему (Momčilović et al., 2011), яке постулює, що NaHCO_3 визначає вміст карбоксильних груп, а NaOH – сумарний вміст КФГ.

Просторову структуру ВМ вивчено методом РФА за допомогою дифрактометра Bruker D8 (Li et al., 2023). Умови запису дифрактограм такі: випромінювання CuK_α (30 кВт, 50 мА, довжина хвилі $\lambda = 0,154$ нм), шаг сканування – 0,019 град, час накопичення сигналу – 20 с/шаг. Дифрактограму просторового каркасу ВМ відокремлювали від вузьких рефлексів мінеральних компонентів інтерполяцією, а потім здійснювали деконволюцію з виділенням «класичної» γ -смуги, рефлексів (002) та (100). Визначали такі параметри супрамолекулярної структури: міжшарову відстань у кристалах d_{002} , висоту L_c , середній діаметр поліаренового фрагменту L_a з експериментально визначеними похибками: ±0,004 нм (d_{002}), ±0,006 нм (L_c), ±0,02 нм (L_a). Середню площу поверхні поліарена (S_{ar}) розраховували за формулою $S_{\text{ar}} = \pi \cdot L_a^2 / 4$.

Характеристики пористості ВМ визначено за ізотермами низькотемпературної (77 К) адсорбції – десорбції азоту (прилад Sorptomatic 1990 Thermo Finnigan), який аналізує пори починаючи з відносного тиску $p/p_0 = 10^{-6} - 10^{-7}$. Перед вимірюваннями зразки ВМ дегазували 20 год (260 °С). Загальний об'єм пор V_t (см³/г) визначали за кількістю N_2 , адсорбованого при відносному тиску $p/p_0 \sim 1.0$. Методом 2D-NLDFT-HS (2-Dimensional Non-local Density Functional Theory, Heterogenous Surface, програма SAIEUS) (Jagiello et al., 2020) розраховували інтегральні та диференційні залежності питомої поверхні S_{DFT} (м²/г) та об'єму пор V (см³/г) від середнього діаметру пор (D , нм). З інтегральних залежностей « $V - D$ » визначали об'єми ультрамікропор (V_{umi}), супермікропор (V_{smi}) та мікропор (V_{mi}); $V_{\text{mi}} = V_{\text{umi}} + V_{\text{smi}}$. Сумарний об'єм мезо- і макропор розраховували за різницею $V_{\text{me+ma}} = V_t - V_{\text{mi}}$. З інтегральних залежностей « $S_{\text{DFT}} - D$ » визначали питому поверхню ультрамікропор (S_{umi}),

супермікропор (S_{smi}), мікропор (S_{mi}) та сумарну поверхню мезо- і макропор (S_{me+ma}) за різницею $S_{me+ma} = S_{DFT} - S_{mi}$. Позначення пор та їхні середні діаметри прийняті відповідно до рекомендації IUPAC (Thommes et al., 2015): ультрамікропори ($D \leq 0,7$ нм), супермікропори ($D = 0,7-2,0$ нм), мікропори ($D \leq 2,0$ нм). Зазначені категорії пор об'єднуються терміном «нанопори» з верхньою межею $D \leq 100$ нм (Thommes et al., 2015).

Адсорбційну ємність за МБ (A_{MB} , мг/г) визначали за методикою (Bedin et al., 2016). Наважку висушеного при $120 \pm 10^\circ\text{C}$ зразка ВМ (0,100 г) поміщали в конічну колбу, вводили розчин МБ (100 см^3) заданої початкової концентрації ($C_{MB(0)} = 100-2000$ мг/дм³) та струшували при 25°C (200 об/хв, баня-шейкер МАХТURDY-45, Daihan Scientific Co). У всіх дослідах вміст ВМ в розчині МБ був постійним – 1 г/л. Після закінчення заданого часу суміш фільтрували та вимірювали оптичну щільність розчину за допомогою спектрофотометра Perkin-Elmer Lambda 20 при довжині хвилі 665 нм. Концентрацію МБ визначали порівнянням з калібрувальним графіком. Кількість адсорбованого МБ визначали за формулою $A = (C_{MB(0)} - C) \times V / m$, де $C_{MB(0)}$ та C – початкова і кінцева концентрації МБ, V – об'єм розчину (100 см^3), m – наважка ВМ (100 мг). Кінцева концентрація C є поточною концентрацією C_t при заданому часі t (хв) або рівноважною $C_{MB(e)}$ (при реєстрації ізотерм адсорбції). Питому адсорбційну ємність $A_{MB(S)}$ (мг/м²) визначали як $A_{MB(S)} = A_{MB} / S_{DFT}$. Параметр $A_{MB(S)}$ є пропорційним концентрації адсорбційних центрів (АЦ) на поверхні ВМ. Додатково розраховували поверхню моношару МБ (S_{MB}), яку може утворювати кількість адсорбату, яка відповідає ємності. Також визначали ступінь заповнення (СЗ) поверхні ВМ барвником при постулюванні, що молекули МБ вкладаються щільно один до одного та є паралельними поверхні ВМ. В цій роботі прийнято середню площу молекули МБ – $1.33 \pm 0.04 \text{ нм}^2$, а площу поверхні моношару МБ – $801 \text{ м}^2/\text{ммоль}$ (Тамаркіна та ін., 2020).

Дані по кінетиці адсорбції МБ апроксимували з використанням моделей псевдо-першого (1) та псевдо-другого (2) порядків, а також рівняння (3) внутрішньочасткової дифузії (3):

$$A_{MB} = A_{MB(m)} [1 - \exp(-k_1 \tau)] \quad (1)$$

$$A_{MB} = k_2 A_{MB(m)}^2 \tau / (1 + k_2 A_{MB(m)} \tau) \quad (2)$$

$$A_{MB} = k_d \tau^{0.5} + C \quad (3)$$

де k_1 , k_2 , k_d – константи псевдо-першого порядку, псевдо-другого порядку та внутрішньочасткової дифузії, відповідно; C – відсічений відрізок вісі Y .

Для розрахунку ізотерм адсорбції використовували двопараметрові моделі Ленгмюра (4) і Фрейндліха (5):

$$A_{MB(e)} = A_{MB(L)} k_L C_{MB(e)} / (1 + k_L C_{MB(e)}) \quad (4)$$

$$A_{MB(e)} = k_F \cdot C_{MB(e)}^{1/n} \quad (5)$$

де $A_{MB(e)}$ – рівноважна адсорбційна ємність, k_L – константа Ленгмюра, k_F та n_F – константи Фрейндліха. Апроксимації виконано мінімізацією середньоквадратичного відхилення, що дає максимальні коефіцієнти R^2 .

Результати та обговорення

Об'єми та величини питомої поверхні різних видів пор отриманих зразків ВМ зведено в табл. 1. З підвищенням температури термохемолізу в інтервалі $350-825^\circ\text{C}$ загальний об'єм адсорбуючих пор V_t збільшується лінійно ($R^2 = 0,975$). Об'єм мікропор збільшується також лінійно ($R^2 = 0,992$). Температурна залежність об'єму ультрамікропор (V_{umi}) складніша: значення V_{umi} збільшуються до 600°C , а потім знижуються.

Об'єм супермікропор V_{smi} зростає у всьому температурному діапазоні, але в інтервалі $600-825^\circ\text{C}$ зростання є більш інтенсивним. Тобто, зі зростанням температури до $\sim 600^\circ\text{C}$ об'єми V_{umi} і V_{smi} збільшуються, а за вищих температур величина V_{umi} знижується, оскільки ультрамікропори трансформуються у супермікропори. Питомі поверхні S_{DFT} та S_{mi} збільшуються із підвищенням температури термохемолізу. Поверхня ультрамікропор S_{umi} змінюється екстремально з максимумом у зразка ВМ(600), що й слід очікувати виходячи з температурної залежності параметра V_{umi} . Зниження величини S_{umi} після максимуму компенсується збільшенням питомої поверхні супермікропор і на температурній залежності параметра S_{mi} позначається мало. Ефект зміни розподілу пор за розмірами у мікропористому діапазоні ($D \leq 2$ нм) зі зростанням температури лужного термохемолізу в літературі не знайдено.

Кінетику адсорбції барвника проілюстровано на прикладах двох зразків ВМ (рис. 1). З часом значення адсорбційної ємності за МБ монотонно збільшуються та протягом ~ 3 год наближаються до максимальних: $A_{MB(m)} = 127$ мг/г для ВМ(700) та $A_{MB(m)} = 175$ мг/г для ВМ(800). Кінетичні дані

Таблиця 1

Об'єми і питома поверхня пор зразків ВМ, отриманих за різних температур лужного термохемолізу

Зразок	Об'єм пор, см ³ /г					Питома поверхня, м ² /г			
	V _t	V _{umi}	V _{smi}	V _{mi}	V _{me+ma}	S _{DFT}	S _{umi}	S _{smi}	S _{mi}
ВМ(350)	0,175	0	0	0	0,175	11	0	0	0
ВМ(400)	0,378	0,025	0,070	0,095	0,283	250	91	108	199
ВМ(450)	0,486	0,096	0,096	0,192	0,294	589	315	235	550
ВМ(500)	0,532	0,126	0,111	0,237	0,295	725	408	285	693
ВМ(550)	0,602	0,141	0,160	0,301	0,301	894	447	413	860
ВМ(600)	0,691	0,165	0,180	0,345	0,346	1021	526	464	990
ВМ(650)	0,750	0,151	0,266	0,417	0,333	1176	481	660	1141
ВМ(700)	0,837	0,144	0,327	0,471	0,366	1318	447	821	1268
ВМ(750)	0,913	0,149	0,368	0,517	0,396	1426	428	937	1365
ВМ(785)	1,047	0,145	0,445	0,590	0,457	1522	458	985	1443
ВМ(800)	1,074	0,142	0,454	0,596	0,478	1530	440	977	1417
ВМ(825)	1,091	0,128	0,481	0,609	0,482	1514	405	1010	1415

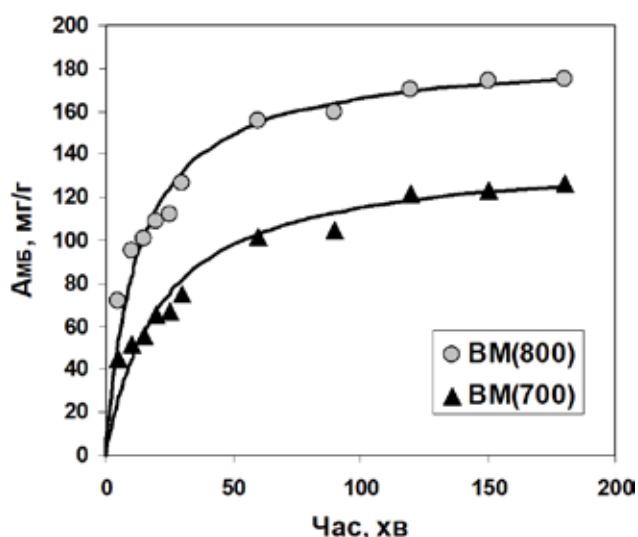


Рис. 1. Кінетика адсорбції МБ зразками ВМ (700) та ВМ(800)

апроксимовано двома різними моделями (табл. 2).

Для одержаних ВМ константи k_1 та

k_2 малі. Для порівняння, в літературі наведено наступні значення констант (для $S_{MB(0)} = 100 - 1000$ мг/л): $k_1 = 0,016 - 0,029$ хв⁻¹, $k_2 = 0,010 - 0,231$ г·мг⁻¹·хв⁻¹ (для ВМ з $S = 1223$ м²/г) (Foo et al., 2012); $k_1 = 0,36 - 1,11$ хв⁻¹, $k_2 = 0,0009 - 0,0177$ г·мг⁻¹·хв⁻¹ (для ВМ з $S = 1534$ м²/г) (Dao et al., 2021).

З огляду на надзвичайно високу чутливість величин k_1 та k_2 до структурних властивостей ВМ, ці константи можна розглядати в якості індивідуальних характеристик ВМ, але їх залежності від властивостей адсорбентів досі не встановлено.

Наведені кінетичні моделі не дозволяють оцінити внесок дифузії в механізм адсорбції МБ. Для ідентифікації транспортних ефектів застосовано модель внутрішньочасткової дифузії (3). У випадку визначальної ролі дифузії МБ залежність адсорбційної ємності A_{MB} від $t^{0.5}$ передається прямою лінією, яка проходить через початок координат, якщо дифузія всередину часток ВМ є швидкістю визначальною стадією. Наявність декіль-

Таблиця 2

Параметри кінетичних моделей псевдо-першого та псевдо-другого порядку адсорбції МБ зразками ВМ(700) та ВМ(800)

Модель	Параметр	ВМ(700)	ВМ(800)
I-порядок	$A_{MB(m)}$, мг/г	127	175
	$k_1 \times 10^3$, хв ⁻¹	21,6	28,9
	R ²	0,967	0,970
II-порядок	$A_{MB(m)}$, мг/г	140,08	186,92
	$k_2 \times 10^5$, г/мг·хв	33,3	42,7
	R ²	0,998	0,992

кох ділянок свідчить про присутність різних механізмів адсорбції. В нашому випадку, залежності A_{MB} від $t^{0.5}$ показують дві ділянки, які описуються лінійними рівняннями (рис. 2) з коефіцієнтами, наведеними в табл. 3. Для отриманих зразків ВМ перші ділянки залежностей A_{MB} від $t^{0.5}$ не проходять через початок координат, отже в цій області дифузія не є лімітуючою. Можна констатувати, що початкова швидкість адсорбції МБ лімітується саме взаємодією з поверхневими адсорбційними центрами ВМ.

Ізотерми адсорбції МБ зразками ВМ(700) та ВМ(800) наведено на рис. 3. Модель Ленгмюра (суцільні лінії) краще апроксимує експериментальні дані: коефіцієнти детермінації ($R^2 \geq 0,997$) вищі за значення R^2 моделі Френдліха (табл. 4). Вона постулює, що поверхня ВМ є хімічно однорідною і максимальна адсорбційна ємність відповідає насиченому моношару МБ. Для більшості пористих матеріалів ця модель найбільш підходить для опису поглинання МБ (Dao et al., 2021; Li et al., 2022; Mbark et al., 2022; Jasri et al., 2023), що виконується і для отриманих зразків ВМ.

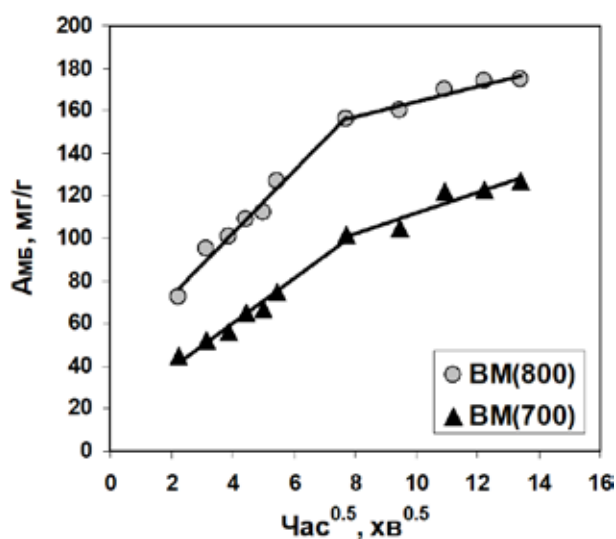


Рис. 2. Модель внутрішньочасткової дифузії МБ в просторові каркаси зразків ВМ(700) та ВМ(800)

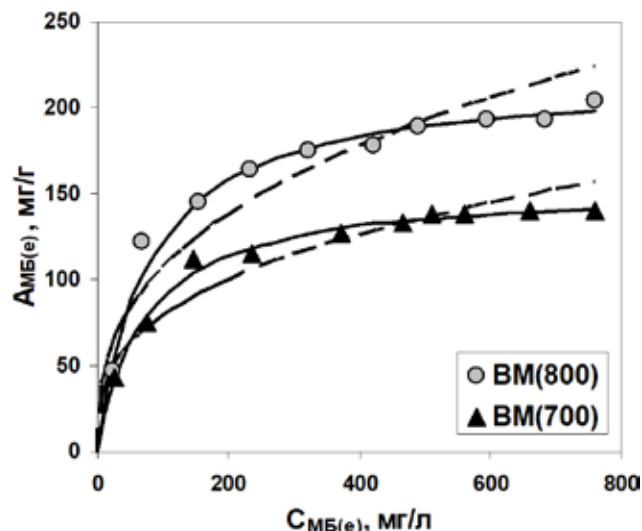


Рис. 3. Ізотерми адсорбції МБ зразками ВМ(Д)(700) та ВМ(Д)(800); суцільні лінії – модель Ленгмюра, пунктирні лінії – модель Френдліха

Для інших зразків ВМ отримано максимальні адсорбційні ємності за МБ ($A_{MB(m)}$) (табл. 5). З ростом температури термохімізму ємність $A_{MB(m)}$ збільшується до максимальної $A_{MB(m)} = 204$ мг/г у ВМ(825). Питома ємність $A_{MB(S)}$, яка характеризує адсорбційну здатність 1 м^2 поверхні ВМ, зменшується у 76 разів зі збільшенням температури до 500°C , а потім помітно збільшується (у ~ 7 разів) при переході від зразка ВМ(500) до ВМ(825).

Привертає увагу низька адсорбційна активність зразків ВМ(Д), отриманих у інтервалі температур $350 - 600^\circ\text{C}$. Значення максимальної ємності знаходяться у вузьких межах $A_{MB(m)} = 14 - 38$ мг/г, тобто майже не змінюється, хоча питома поверхня цих зразків збільшується в 92 рази (з $11 \text{ м}^2/\text{г}$ до $1021 \text{ м}^2/\text{г}$). На залежності ємності за МБ від питомої поверхні ВМ (лінія 1, рис. 4) виділяються дві області значень, які апроксимуються двома лінійними залежностями: $A_{MB(m)} = 0,0035 \cdot S_{DFT} - 18,07$ ($R^2 = 0,036$) та $A_{MB(m)} = 0,3 \cdot S_{DFT} - 256$ ($R^2 = 0,971$). Тобто, зро-

Таблиця 3

Параметри моделі внутрішньочасткової дифузії адсорбції МБ зразками ВМ(700) та ВМ(800)

Зразок	Параметри					
	k_{d1} , мг/г·хв ^{0.5}	k_{d2} , мг/г·хв ^{0.5}	C_{d1} , мг/г	C_{d2} , мг/г	R^2_{d1}	R^2_{d2}
ВМ(700)	10,45	4,85	18,29	63,59	0,981	0,900
ВМ(800)	14,65	3,71	43,4	127	0,981	0,945

Таблиця 4

Параметри моделей ізотерм адсорбції МБ зразками ВМ(Д)

Зразок	Модель Ленгмюра		Модель Фрейндліха	
	$A_{MB(L)}$, мг/г		$k_F, (мг/г)(л/мг)^{1/n}$	
ВМ(Д)(700)	$A_{MB(L)}$, мг/г	154,42	$k_F, (мг/г)(л/мг)^{1/n}$	16,68
	$k_L \times 10^3, л/мг$	14,0	n	2,96
	R ²	0,998	R ²	0,921
ВМ(Д)(800)	$A_{MB(L)}$, мг/г	218,44	$k_F, (мг/г)(л/мг)^{1/n}$	20,07
	$k_L \times 10^3, л/мг$	13,0	n	2,75
	R ²	0,997	R ²	0,870

Таблиця 5

Структурні та адсорбційні властивості ВМ, отриманих за різних температур

Зразок	С, %	[КФГ], ммоль/г	d_{002} , нм	L_a , нм	$A_{MB(m)}$, мг/г	$A_{MB(s)}$, мкг/м ²	СЗ
ВМ(350)	73,7	1,95	0,395	1,45	16	1441	3,61
ВМ(400)	74,0	2,24	0,402	1,55	26	104	0,26
ВМ(450)	73,2	2,51	0,400	1,50	15	25	0,06
ВМ(500)	71,3	3,16	0,408	1,70	14	19	0,05
ВМ(550)	72,2	3,72	0,417	1,75	28	31	0,08
ВМ(600)	72,7	3,87	0,431	1,87	38	37	0,09
ВМ(650)	74,5	3,59	0,440	2,10	83	71	0,18
ВМ(700)	77,7	2,94	0,435	2,61	140	106	0,27
ВМ(750)	79,7	1,81	0,442	3,20	191	134	0,34
ВМ(785)	84,9	1,39	0,446	3,24	189	124	0,31
ВМ(800)	85,5	0,83	0,441	3,24	204	133	0,33
ВМ(825)	85,9	0,78	0,437	3,30	204	135	0,34

стання питомої поверхні до $S_{DFT} \approx 900 \text{ м}^2/\text{г}$ не супроводжується збільшенням числа поверхневих АЦ. Ємність за МБ майже постійна при $S_{DFT} \leq 900 \text{ м}^2/\text{г}$, тобто в цій області додаткові АЦ практично не утво-

рюються або є просторово недоступними молекулам або іонам барвника. А в області величин $S_{DFT} > 900 \text{ м}^2/\text{г}$ спостерігається інтенсивне утворення цих АЦ, пропорційне зростанню поверхні зразків ВМ.

В літературі зазначаються основні процеси, які обумовлюють адсорбційну ємність вулцевого матеріалу по відношенню до МБ: об'ємне заповнення пор, утворення водневих зв'язків, електростатична взаємодія, π - π взаємодія (Dao et al., 2021; Maharatra et al., 2021; Jasri et al., 2023). Електростатичну взаємодію з катіонами МБ забезпечують негативно заряджені АЦ, зокрема фенолятні та карбоксилатні аніонні центри. Функційні групи, що містять водень (-ОН та -СООН групи), можуть утворювати водневі зв'язки з N-атомами молекули МБ. Донорно-акцепторна взаємодія π -системи МБ та π -системи поліаренового фрагменту просторового каркасу ВМ (π - π взаємодія, π - π stacking) формує комплекси з пошаровим розміщенням молекули МБ та поліарена ВМ (Jawad et al., 2021; Jasri et al., 2023).

Об'ємне заповнення пор завжди робить внесок в адсорбційну ємність. Якщо зміни ємності за МБ зіставити зі змінами об'ємів

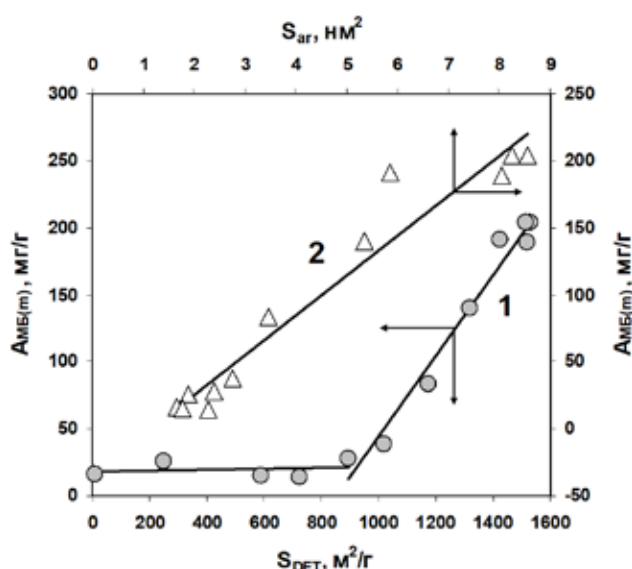


Рис. 4. Залежності адсорбційної ємності за МБ від питомої поверхні (1) та площі поліаренового фрагменту ВМ (2)

різних пор, то отримуємо наступне. Зі зростанням загального об'єму пор V_t до $\sim 0,6 \text{ см}^3/\text{г}$ значення $A_{\text{МБ}(m)}$ малі та майже постійні. Подальше підвищення величини V_t супроводжується збільшенням ємності та апроксимується рівнянням $A_{\text{МБ}(m)} = 385 \cdot V_t - 202$ ($R^2 = 0,918$). При збільшенні об'єму ультрамікропор V_{umi} значення $A_{\text{МБ}(m)}$ залишаються незмінними до величини $V_{\text{umi}} = 0,15 \text{ см}^3/\text{г}$, але потім суттєво зростають, хоча величина V_{umi} не змінюється (рис. 5). Тобто, ємність за МБ ніяк не залежить від змін об'єму ультрамікропор. Підвищення об'єму супермікропор V_{smi} супроводжується збільшенням $A_{\text{МБ}(m)}$ в інтервалі $V_{\text{smi}} = 0,1-0,5 \text{ см}^3/\text{г}$ (див. рис. 5) та описується кореляційним рівнянням $A_{\text{МБ}(m)} = 556 \cdot V_{\text{smi}} - 50$ ($R^2 = 0,964$). Аналогічне рівняння для сумарного об'єму мезопор та макропор має вигляд $A_{\text{МБ}(m)} = 1024 \cdot V_{\text{me+ma}} - 272$ ($R^2 = 0,884$).

Звертаємо увагу, що коефіцієнти кореляційних рівнянь за параметрами V_t , V_{smi} і $V_{\text{me+ma}}$ відрізняються один від одного і збільшуються в ряду ($\text{мг}/\text{см}^3$): $385 (V_t) < 556 (V_{\text{smi}}) < 1024 (V_{\text{me+ma}})$. Тобто, ємність $A_{\text{МБ}(m)}$ найсильніше реагує на зміни об'єму мезопор ($D \geq 2 \text{ нм}$) та в ~ 2 рази слабше на зміни об'єму супермікропор ($D = 0,7 - 2 \text{ нм}$). Очевидно, що об'ємне заповнення пор впливає на адсорбційну активність ВМ, але його внесок важко відрізнити від вкладів інших процесів.

Зіставлення температурних залежностей адсорбційної ємності за МБ та вмісту

кислотних КФГ (рис. 6) показує наступне. Підвищення вмісту КФГ до температури 600°C не викликає відповідного зростання ємності $A_{\text{МБ}(m)}$. Більш того, значення $A_{\text{МБ}(m)}$ практично постійні, хоча ємність мала збільшуватися внаслідок посилення електростатичної взаємодії та утворення водневих зв'язків. Можливим поясненням цього є недоступність новостворених КФГ, які знаходяться в мікропорах, оскільки і КФГ і мікропори формує саме гідроксид калію. Розміри молекули МБ не дозволяють або сильно ускладнюють дифузю МБ у мікропористу структуру ВМ.

На адсорбційну ємність за МБ сильно впливають донорно-акцепторні взаємодії π -систем МБ та поліаренових фрагментів просторового каркасу ВМ. Спостерігається виразна тенденція збільшення величини $A_{\text{МБ}(m)}$ зі збільшенням площі поверхні поліарена (лінія 2, рис. 4), яка апроксимується лінійним кореляційним рівнянням $A_{\text{МБ}(m)} = 29,69 \cdot S_{\text{ar}} - 33,52$ ($R^2 = 0,945$). Але пропорційність збільшення $A_{\text{МБ}(m)}$ та S_{ar} не дотримується: адсорбційна ємність зростає в 12,75 разів, а площа поліарена – в 5,18 разів. Якби ємність також збільшилась у 5,18 разів, ємність зразка ВМ(Д)(825) була б $A_{\text{МБ}(m)} = 82,9 \text{ мг}/\text{г}$ (а не $204 \text{ мг}/\text{г}$). Ймовірно, ця різниця може бути віднесена до заповнення мезопор.

Висновки

Спільний аналіз даних з кінетики адсорбції, складу КФГ та температур-

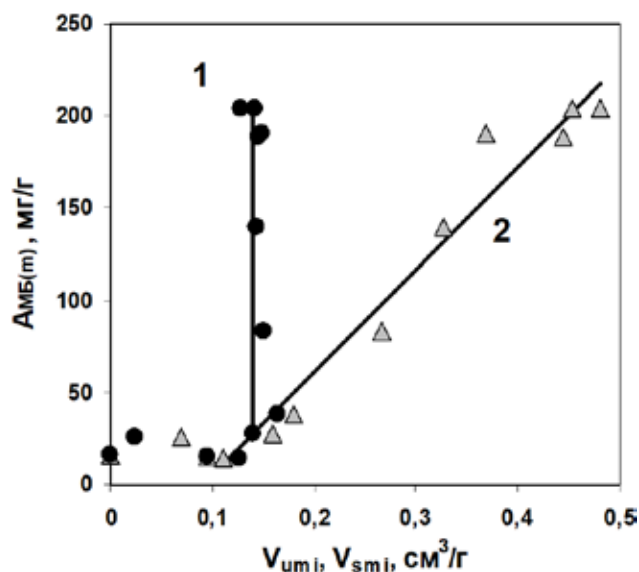


Рис. 5. Адсорбційна ємність за МБ як функція об'єму ультрамікропор V_{umi} (1) та супермікропор V_{smi} (2)

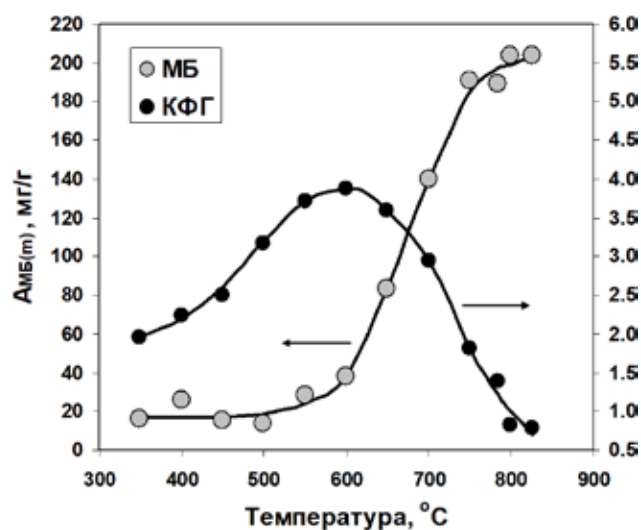


Рис. 6. Температурні залежності адсорбційної ємності за МБ та вмісту кислотних груп зразків ВМ

них залежностей дозволяє стверджувати наступне.

1. Температура лужного термохемолізу визначає характеристики пористої структури та адсорбційну ємність за МБ зразків ВМ з довгополуменевого вугілля. Найбільша питома поверхня (1514–1530 м²/г) та ємність (189–204 мг/г) притаманна ВМ, отриманим при 785–825 °С.

2. Кінетика адсорбції МБ (25 °С) підпорядковується моделі псевдо-другого порядку ($R^2 \geq 0,992$), адсорбційна рівновага досягається за ~3 год. Швидкість визначальною стадією є взаємодія молекул адсорбата з поверхневими адсорбційними центрами (АЦ), тобто фізична сорбція і хемосорбція.

3. Ізотерми адсорбції (25 °С) краще описуються моделлю Ленгмюра ($R^2 \geq 0,997$) ніж моделлю Фрейндліха ($R^2 \geq 0,870$). Для зразків ВМ, отриманих при температурах ≥ 700 °С, константи Ленгмюра є близькими $k_L = 12 \cdot 10^{-3} - 14 \cdot 10^{-3}$ л/мг при варіюванні питомої поверхні в межах 1318–1530 м²/г.

4. Ємності за МБ зразків ВМ, отриманих в діапазоні 350–825 °С, формують S-подібну температурну залежність. Питома ємність, яка визначає адсорбційну здатність 1 м² поверхні, мінімальна у ВМ(500) та збільшується у ~7 разів з підвищенням температури термохемолізу до 825 °С.

5. При збільшенні питомої поверхні ВМ до ~900 м²/г ємність за МБ варіюється у вузьких межах (14 – 38 мг/г), отже в цій області АЦ практично не утворюються або просто рово недоступні. В області 900–1530 м²/г формування додаткових АЦ пропорційне зростанню питомої поверхні.

6. Головні чинники, які визначають адсорбційну ємність отриманих ВМ, є об'ємне заповнення мезопор та п-п взаємодія ароматичної системи МБ та поліаренового фрагменту просторового каркасу ВМ. Кислотні функційні групи не відіграють істотної ролі в поглинанні МБ внаслідок їх розміщення на поверхні мікропор, які є малодоступними для молекул барвника.

Список використаних джерел

- Тамаркіна Ю.В., Аніщенко В.М., Редько А.М., Кучеренко В.О. Адсорбційні властивості викапного вугілля, активованого гідроксидом калію. Вплив ступеня метаморфізму. *Хімія, фізика та технологія поверхні*. 2020. Т. 11. № 2. С. 175–189. <https://doi.org/10.15407/hftp11.02.175>.
- Bedin K.C., Martins A.C., Cazetta A.L., Pezoti O., Almeida V.C. KOH-activated carbon prepared from sucrose spherical carbon: Adsorption equilibrium, kinetic and thermodynamic studies for Methylene Blue removal. *Chemical Engineering Journal*. 2016. Vol. 286. P. 476–484. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.10.099>
- Dao M.U., Le H.S., Hoang H.Y., Tran V.A., Doan V.D., Le T.T.N., Sirotkin A. Natural core-shell structure activated carbon beads derived from Litsea glutinosa seeds for removal of methylene blue: facile preparation, characterization, and adsorption properties. *Environ. Res.* 2021. Vol. 198. 110481. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110481>.
- Foo K.Y., Hameed B.H. Adsorption characteristics of industrial solid waste derived activated carbon prepared by microwave heating for methylene blue // *Fuel Proces. Technol.* 2012. Vol. 99. P. 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.01.031>.
- Gayathiri M., Pulingam T., Lee K.T., Sudesh K. Activated carbon from biomass waste precursors: Factors affecting production and adsorption mechanism. *Chemosphere*. 2022. Vol. 294. 133764. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133764>.
- Hamyali H., Nosratinia F., Rashidi A., Ardjmand M. Anthracite coal-derived activated carbon as an effectiveness adsorbent for superior gas adsorption and CO₂ / N₂ and CO₂ / CH₄ selectivity: Experimental and DFT study. *J. Environ. Chem. Eng.* 2022. Vol. 10. Is. 1. 107007. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107007>.
- Jagiello J., Kyotani T., Nishihara H. Development of a simple NLDFT model for the analysis of adsorption isotherms on zeolite templated carbon (ZTC). *Carbon*. 2020. Vol. 169. P. 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.06.032>.
- Jasri K., Abdulhameed A.S., Jawad A.H., Al Othman Z.A., Yousef T.A., Al Duaij O.K. Mesoporous activated carbon produced from mixed wastes of oil palm frond and palm kernel shell using microwave radiation-assisted K₂CO₃ activation for methylene blue dye removal: Optimization by response surface methodology. *Diamond and Related Materials*. 2023. Vol. 131. 109581. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109581>.

- Javed H., Luong D.X., Lee C.-G., Zhang D., Tour J.M., Alvarez P.J.J. Efficient removal of bisphenol-A by ultra-high surface area porous activated carbon derived from asphalt. *Carbon*. 2018. Vol. 140. P. 441–448. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.08.038>.
- Jawad A.H., Abdulhameed A.S., Bahrudin N.N., Hum N.N.M.F., Surip S.N., Syed-Hassan S.S.A., Sabar S. Microporous activated carbon developed from KOH activated biomass waste: surface mechanistic study of methylene blue dye adsorption. *Water Sci. Technol.* 2021. Vol. 84. Is. 8. P. 1858–1872. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.355>
- Li H., Budarin V.L., Clark J.H., North M., Wu X. Rapid and efficient adsorption of methylene blue dye from aqueous solution by hierarchically porous. activated starbons®: Mechanism and porosity dependence. *J. Hazard. Materials*. 2022. Vol. 436. 129174. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129174>.
- Li H., Hou Y., He Z., Wei J., Ren S., Wu W. Structural evolution characteristics of lignite during pyrolysis based on alkaline-oxygen oxidation, NMR and FTIR. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 2023. Vol. 172. 105980. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105980>.
- Li L., Wu M., Song C., Liu L., Gong W., Ding Y., Yao J. Efficient removal of cationic dyes via activated carbon with ultrahigh specific surface derived from vinasse wastes. *Bioresour. Technol.* 2021. Vol. 322. 124540. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124540>
- Liu G., Qiu L., Deng H., Wang J., Yao L., Deng L. Ultrahigh surface area carbon nanosheets derived from lotus leaf with super capacities for capacitive deionization and dye adsorption. *Appl. Surf. Sci.* 2020. Vol. 524. 146485. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146485>.
- Mahapatra U., Chatterjee A., Das C., Manna A.K. Adsorptive removal of hexavalent chromium and methylene blue from simulated solution by activated carbon synthesized from natural rubber industry biosludge. *Environ. Technol. Innov.* 2021. Vol. 22. 101427. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101427>.
- Mbarki F., Selmi T., Kesraoui A., Seffen M. Low-cost activated carbon preparation from Corn stigmata fibers chemically activated using H₃PO₄, ZnCl₂ and KOH: Study of methylene blue adsorption, stochastic isotherm and fractal kinetic. *Industrial Crops and Products*. 2022. Vol. 178. 114546. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114546>.
- Momčilović M., Purenović M., Bojić A., Zarubica A., Randelović M. Removal of lead(II) ions from aqueous solutions by adsorption onto pine cone activated carbon. *Desalination*. 2011. Vol. 276. Is. 1–3. P. 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.03.013>.
- Oladoye P.O., Ajiboye T.O., Omotola E.O., Oyewola O.J. Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater. *Results in Engineering*. 2022. Vol. 16. 100678. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100678>.
- Ramutshatsha-Makhwedzha D., Mavhungu A., Moropeng M.L., Mbaya R. Activated carbon derived from waste orange and lemon peels for the adsorption of methyl orange and methylene blue dyes from wastewater. *Heliyon*. 2022. Vol. 8. Is. 8. e09930. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09930>.
- Seow Y.X., Tan Y.H., Mubarak N.M., Kansedo J., Khalid M., Ibrahim M.L., Ghasemi M. A review on biochar production from different biomass wastes by recent carbonization technologies and its sustainable applications. *J. Environ. Chem. Eng.* 2022. Vol. 10. Is. 1. 107017. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107017>.
- Thommes M., Kaneko K., Neimark A.V., Olivier J.P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J., Sing K.S.W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem.* 2015. Vol. 87. Is. 9–10. P. 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>.
- Tiwari D., Bhunia H., Bajpai P.K. Adsorption of CO₂ on KOH activated, N-enriched carbon derived from urea formaldehyde resin: kinetics, isotherm and thermodynamic studies. *Appl. Surf. Sci.* 2018. Vol. 439. P. 760–771. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.12.203>.
- Wei F., Zhang H., He X., Ma H., Dong S., Xie X. Synthesis of porous carbons from coal tar pitch for high-performance supercapacitors. *New carbon materials*. 2019. Vol. 34. Is. 2. P. 132–139. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(19\)60006-5](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(19)60006-5).
- Xing B.-L., Guo H., Chen L.-J., Chen Z.-F., Zhang C.-X., Huang G.-X., Xie W., Yu J.-L. Lignite-derived high surface area mesoporous activated carbons for electrochemical capacitors. *Fuel Process. Technol.* 2015. Vol. 138. P. 734–742. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.07.017>.
- Yu Y., Qiao N., Wang D., Zhu Q., Fu F., Cao R., Wang R., Liu W., Xu B. Fluffy honeycomb-like activated carbon from popcorn with high surface area and well-developed porosity for ultra-high

efficiency adsorption of organic dyes. *Bioresour. Technol.* 2019. Vol. 280. 121340. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121340>.

Zhang Y., Zheng Y., Yang Y., Huang J., Zimmerman A.R., Chen H., Hu X., Gao B. Mechanisms and adsorption capacities of hydrogen peroxide modified ball milled biochar for the removal of methylene blue from aqueous solutions. *Bioresour. Technol.* 2021. Vol. 337. 125432. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125432>.

Zhao C., Ge L., Mai L., Li X., Chen S., Li Q., Li S., Yao L., Wang Y., Xu C. Review on coal-based activated carbon: preparation, modification, application, regeneration, and perspectives. *Energy & Fuels.* 2023. Vol. 37. Is. 16. P. 11622–11642. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c01866>.

References (translated & transliterated)

Tamarkina, Ju.V., Anishhenko, V.M., Red'ko, A.M., & Kucherenko, V.A. (2020). Adsorbcijni vlastyvoli vykopnogho vughillja, aktyvovanogho gidroksydom kaliju. Vplyv stupenja metamorfizmu [Adsorption properties of coals activated with potassium hydroxide. Influence of coal rank]. *Khim. Fiz. Tekhnol. Poverhni [Chemistry, Physics and Technology of Surface]*, 11 (2), 175–189. <https://doi.org/10.15407/hftp11.02.175> [in Ukrainian].

Bedin, K.C., Martins, A.C., Cazetta, A.L., Pezoti, O., & Almeida, V.C. (2016). KOH-activated carbon prepared from sucrose spherical carbon: Adsorption equilibrium, kinetic and thermodynamic studies for Methylene Blue removal. *Chemical Engineering Journal*, 286, 476–484. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.10.099> [in English].

Dao, M.U., Le, H.S., Hoang, H.Y., Tran, V.A., Doan, V.D., Le, T.T.N., & Sirotkin, A. (2021). Natural core-shell structure activated carbon beads derived from Litsea glutinosa seeds for removal of methylene blue: facile preparation, characterization, and adsorption properties. *Environ. Res.*, 198, 110481. <https://doi.org/10.1016/j.envres.110481> [in English].

Foo, K.Y., & Hameed, B.H. (2012). Adsorption characteristics of industrial solid waste derived activated carbon prepared by microwave heating for methylene blue. *Fuel Proces. Technol.*, 99, 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.01.031> [in English].

Gayathiri, M., Pulingam, T., Lee, K.T., & Sudesh, K. (2022). Activated carbon from biomass waste precursors: Factors affecting production and adsorption mechanism. *Chemosphere*, 294, 133764. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133764> [in English].

Hamyali, H., Nosratinia, F., Rashidi, A., & Ardjmand, M. (2022). Anthracite coal-derived activated carbon as an effectiveness adsorbent for superior gas adsorption and CO₂ / N₂ and CO₂ / CH₄ selectivity: Experimental and DFT study. *J. Environ. Chem. Eng.*, 10 (1), 107007. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107007> [in English].

Jagiello, J., Kyotani, T., & Nishihara, H. (2020). Development of a simple NLDFT model for the analysis of adsorption isotherms on zeolite templated carbon (ZTC). *Carbon*, 169, 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.06.032> [in English].

Jasri, K., Abdulhameed, A.S., Jawad, A.H., Al Othman, Z.A., Yousef, T.A., & Al Duaij, O.K. (2023). Mesoporous activated carbon produced from mixed wastes of oil palm frond and palm kernel shell using microwave radiation-assisted K₂CO₃ activation for methylene blue dye removal: Optimization by response surface methodology. *Diamond and Related Materials*, 131, 109581. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109581> [in English].

Jawad, A.H., Abdulhameed, A.S., Bahrudin, N.N., Hum, N.N.M.F., Surip, S.N., Syed-Hassan, S.S.A., & Sabar, S. (2021). Microporous activated carbon developed from KOH activated biomass waste: surface mechanistic study of methylene blue dye adsorption. *Water Sci. Technol*, 84 (8), 1858–1872. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.355> [in English].

Javed, H., Luong, D.X., Lee, C.-G., Zhang, D., Tour, J.M., & Alvarez, P.J.J. (2018). Efficient removal of bisphenol-A by ultra-high surface area porous activated carbon derived from asphalt. *Carbon*, 140, 441–448. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.08.038> [in English].

Li, H., Budarin, V.L., Clark, J.H., North, M., & Wu, X. (2022). Rapid and efficient adsorption of methylene blue dye from aqueous solution by hierarchically porous. activated starbons®: Mechanism and porosity dependence. *J. Hazard. Materials*, 436, 129174. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129174> [in English].

Li, H., Hou, Y., He, Z., Wei, J., Ren, S., & Wu, W. (2023). Structural evolution characteristics of lignite during pyrolysis based on alkaline-oxygen oxidation, NMR and FTIR. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 172, 105980. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105980> [in English].

- Li, L., Wu, M., Song, C., Liu, L., Gong, W., Ding, Y., & Yao, J. (2021). Efficient removal of cationic dyes via activated carbon with ultrahigh specific surface derived from vinasse wastes. *Bioresour. Technol.*, 322, 124540. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124540> [in English].
- Liu, G., Qiu, L., Deng, H., Wang, J., Yao, L., & Deng, L. (2020). Ultrahigh surface area carbon nanosheets derived from lotus leaf with super capacities for capacitive deionization and dye adsorption. *Appl. Surf. Sci.*, 524, 146485. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146485> [in English].
- Mahapatra, U., Chatterjee, A., Das, C., & Manna, A.K. (2021). Adsorptive removal of hexavalent chromium and methylene blue from simulated solution by activated carbon synthesized from natural rubber industry biosludge. *Environ. Technol. Innov.*, 22, 101427. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101427> [in English].
- Mbarki, F., Selmi, T., Kesraoui, A., & Seffen, M. (2022). Low-cost activated carbon preparation from Corn stigmata fibers chemically activated using H_3PO_4 , $ZnCl_2$ and KOH: Study of methylene blue adsorption, stochastic isotherm and fractal kinetic. *Industrial Crops and Products*, 178, 114546. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114546> [in English].
- Momčilović, M., Purenović, M., Bojić, A., Zarubica, A., & Randelović, M. (2011). Removal of lead(II) ions from aqueous solutions by adsorption onto pine cone activated carbon. *Desalination*, 276 (1–3), 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.03.013> [in English].
- Oladoye, P.O., Ajiboye, T.O., Omotola, E.O., & Oyewola, O.J. (2022). Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater. *Results in Engineering*, 16, 100678. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100678> [in English].
- Ramutshatsha-Makhwedzha, D., Mavhungu, A., Moropeng, M.L., & Mbaya, R. (2022). Activated carbon derived from waste orange and lemon peels for the adsorption of methyl orange and methylene blue dyes from wastewater. *Heliyon*, 8 (8), e09930. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09930> [in English].
- Seow, Y.X., Tan, Y.H., Mubarak, N.M., Kandedo, J., Khalid, M., Ibrahim, M.L., & Ghasemi, M. (2022). A review on biochar production from different biomass wastes by recent carbonization technologies and its sustainable applications. *J. Environ. Chem. Eng.*, 10 (1), 107017. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107017> [in English].
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A.V., Olivier, J.P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K.S.W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem.*, 87 (9–10), 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117> [in English].
- Tiwari, D., Bhunia, H., & Bajpai, P.K. (2018). Adsorption of CO_2 on KOH activated, N-enriched carbon derived from urea formaldehyde resin: kinetics, isotherm and thermodynamic studies. *Appl. Surf. Sci.*, 439, 760–771. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.12.203> [in English].
- Wei, F., Zhang, H., He, X., Ma, H., Dong, S., & Xie, X. (2019). Synthesis of porous carbons from coal tar pitch for high-performance supercapacitors. *New carbon materials*, 34 (2), 132–139. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(19\)60006-5](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(19)60006-5) [in English].
- Xing, B.-L., Guo, H., Chen, L.-J., Chen, Z.-F., Zhang, C.-X., Huang, G.-X., Xie, W., & Yu, J.-L. (2015). Lignite-derived high surface area mesoporous activated carbons for electrochemical capacitors. *Fuel Process. Technol.*, 138, 734–742. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.07.017> [in English].
- Yu, Y., Qiao, N., Wang, D., Zhu, Q., Fu, F., Cao, R., Wang, R., Liu, W., & Xu, B. (2019). Fluffy honeycomb-like activated carbon from popcorn with high surface area and well-developed porosity for ultra-high efficiency adsorption of organic dyes. *Bioresour. Technol.*, 280, 121340. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121340> [in English].
- Zhang, Y., Zheng, Y., Yang, Y., Huang, J., Zimmerman, A.R., Chen, H., Hu, X., & Gao, B. (2021). Mechanisms and adsorption capacities of hydrogen peroxide modified ball milled biochar for the removal of methylene blue from aqueous solutions. *Bioresour. Technol.*, 337, 125432. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125432> [in English].
- Zhao, C., Ge, L., Mai, L., Li, X., Chen, S., Li, Q., Li, S., Yao, L., Wang, Y., & Xu, C. (2023). Review on coal-based activated carbon: preparation, modification, application, regeneration, and perspectives. *Energy Fuels*, 37 (16), 11622–11642. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c01866> [in English].

Отримано: 27.03.2024

Прийнято: 03.04.2024



УДК 544.654.076.324.2

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.18>

ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОКИСНЕННЯ ПІРИДОКСИНУ ГІДРОХЛОРИДУ НА МАСИВАХ ГОСТРІЙНИХ СТРУКТУР, МОДИФІКОВАНИХ ПЛАТИНОЮ

О. П. Шевченко¹, О. А. Лут², Ю. А. Шафорост³, О. С. Погребняк⁴

Проведені вольтамперометричні дослідження процесу електроокиснення піридоксину з використанням наноструктурованої поверхні платини в якості електродного матеріалу. Процес окиснення піридоксину гідрохлориду проводили в кислому та лужному середовищі на фоні натрій перхлорату. Інтенсивність роботи виготовленого електроду порівнювали із процесом, що проходив на гладкому платиновому електроді. При проведенні експериментальних досліджень використали вольтамперометрію з лінійною та циклічною розгорткою потенціалу.

Порівнюючи потенціодинамічні криві електроокиснення піридоксину гідрохлориду на гладкому та наноструктурованому платиновому електроді було встановлено, що величина потенціалів для граничного струму при еквімолярних концентраціях вітаміну В₆ для електроду з розвиненою поверхнею має менш позитивне значення потенціалу розряду. Число електронів, що приймають участь в електродному процесі склали 2,18.

Хід одержаних кривих та зростання перенапруги в першу чергу обумовлюється пониженням адсорбуючої здатності піридоксину гідрохлориду при зростанні температури, що підпорядкову-

¹ кандидат хімічних наук,
доцент кафедри хімії та наноматеріалознавства
(Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси)
e-mail: pogrebniak_oleg@ukr.net
ORCID: 0009-0007-5769-1884

² кандидат хімічних наук,
доцент кафедри хімії та наноматеріалознавства
(Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси)
e-mail: Lutlen@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0288-4255

³ кандидат хімічних наук,
доцент кафедри хімії та наноматеріалознавства
(Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси)
e-mail: zdoryulia@vu.cdu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-0002-2803

⁴ кандидат хімічних наук,
доцент кафедри хімії та наноматеріалознавства
(Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси)
e-mail: pogrebniak-oleg@vu.cdu.edu.ua
ORCID: 0009-0000-2289-0487

ється теорії адсорбційних процесів. За результатами аналізу одержаних вольтамперометричних кривих провели розрахунок константи швидкості та коефіцієнта дифузії процесу окиснення деполаризатора на наноструктурованому платиновому електроді. Використаний вольтамперометричний метод з лінійною та циклічною розгорткою потенціалу на наноструктурованих поверхнях платини є хорошою альтернативою для аналітичного визначення B_6 , оскільки він простий, дешевий і має низьку межу виявлення, а також має достатню точність і чутливість. Межа виявлення становить $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³.

Ключові слова: наноструктурована поверхня, деполаризатор, модифікована платина, вольтамперометрія, електроокиснення.

VOLTAMMETRIC STUDIES OF PYRIDOXINE HYDROCHLORIDE OXIDATION ON ARRAYS OF SHARP STRUCTURES MODIFIED WITH PLATINUM

O. P. Shevchenko, O. A. Lut, Ju. A. Shaforost, O. S. Poghrebnyak

Voltammetry studies of the process of electrooxidation of pyridoxine using the nanostructured surface of platinum as an electrode material were carried out. The oxidation process of pyridoxine hydrochloride was carried out in an acidic and alkaline environment against the background of sodium perchlorate.

The intensity of the manufactured electrode was compared with the process on a smooth platinum electrode. In experimental studies, voltammetry with linear and cyclic potential sweep was used.

Comparing the potentiodynamic electrooxidation curves of pyridoxine hydrochloride on a smooth and nanostructured platinum electrode, it can be noted that the value of current maximum potentials at the same depolarizer concentration for an electrode with a nanostructured surface has a lower positive value. The number of electrons participating in the electrode process was calculated according to the well-known Levic limiting current equation of 2.18.

The course of the obtained curves and the increase in overvoltage is primarily due to a decrease in the adsorption capacity of pyridoxine hydrochloride with an increase in temperature, which is subject to the theory of adsorption processes. Based on the results of the analysis of the obtained voltammetry curves, the calculation of the rate constant and the diffusion coefficient of the depolarizer oxidation process on a nanostructured platinum electrode was calculated.

The voltammetry method used with linear and cyclic potential sweep on nanostructured platinum surfaces is a good alternative for the analytical determination of B_6 because it is simple, cheap and has a low detection limit, as well as having sufficient accuracy and sensitivity. The detection limit is $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ mol/dm³.

Key words: nanostructured surface, depolarizer, modified platinum, voltammetry, electrooxidation.

Вступ

Вітаміни входять до групи речовин, які суттєво впливають на ріст та фізіологічні процеси, що відбуваються в людському організмі. Деякі з них можуть бути отримані тільки з їжею або фармацевтичними препаратами у зв'язку з неможливістю синтезу їх в організмі. Першим виділеним вітаміном групи В був піридоксин, який є найбільш важливим для нормалізації обміну речовин у живих організмах (Шевченко і Сосюк, 2023).

Вітамін B_6 , також відомий як піридоксин, є важливим вітаміном, який допомагає у формуванні здорових еритроцитів і підтримує більше життєво важливих функцій організму, ніж будь-які інші вітаміни. Наприклад, вітамін B_6 необхідний для роботи більш ніж 100 ферментів, які беруть участь у білковому обміні. Він також необхідний для метаболізму еритроцитів. Нервова та

імунна системи потребують вітаміну B_6 для ефективного функціонування, а також для перетворення триптофану (амінокислоти) на ніацин (вітамін). Тому дуже важливим завданням є розробка чутливих та простих методів, які дозволяють проводити кількісні та якісні визначення піридоксину.

Вітамін B_6 є похідним 3-гідрокси-2-метилпіридину, який включає три метаболічно та функціонально пов'язані хімічні форми: групи піридоксолу, піридоксалу та піридоксаміну, які розташовані в четвертому положенні піридинового кільця. Кількісний аналіз вітаміну B_6 є дуже важливим для збереження здоров'я. Розроблено деякі методи його визначення, наприклад, іонообмінна хроматографія, рідинна хроматографія, високоефективна рідинна хроматографія, проточна інжекційна твердофазна спектрофотометрія, флуоресцентна спектрометрія, газова хромато-мас-спек-

трометрия (Шевченко та ін., 2023а). Проведено також розділення та визначення V_6 методами хроматографії та електрофору з амперометричним методом.

Протягом останніх десятиліть спостерігається залучення великої кількості різноманітних фізико-хімічних та електрохімічних методів аналізу для визначення вітамінів групи В у різних об'єктах (David et al., 2015; Мартинюк та ін., 2023). Для визначення вітамінів групи В досить широко використовують пряму потенціометрію або потенціометричне титрування із застосуванням іон-селективних електродів.

Досить часто при використанні електрохімічних методів аналізу застосовують вольтамперометричні методи, які дозволяють проводити як якісні, так і кількісні дослідження. Останні є дуже високочутливими та досить точні, не вимагають дорогої апаратури та є експресними. Найчастіше для визначення вітамінів групи В використовують циклічну, лінійну, інверсійну або диференціально-імпульсний вольтамперометрію на вуглецевих, скло-вуглецевих, модифікованих електродах (Mehdi Motaghi et al., 2016).

Седерхельм і Ліндквіст були першими, хто дослідив вольтамперометричне визначення вітаміну V_6 за допомогою електроду з вугільної пасти. Окиснення піридоксину та споріднених сполук в аміачному буфері оцінювали за допомогою циклічної вольтамперометрії. Проте спостерігалася серйозна проблема із впливом аскорбінової кислоти та заліза (II) на відгук електроду (Teixeira et al., 2004).

Електрохімічну поведінку електроду з вугільної пасти, модифікованого комплексом N,N -етилен-біс(саліциліденеімінато) оксованадію(IV) досліджували при електроокисненні піридоксину за допомогою циклічної вольтамперометрії (Teixeira et al., 2004). Лінійну концентраційну залежність для піридоксину було отримано в діапазоні концентрацій від $4,5 \cdot 10^{-4}$ до $3,3 \cdot 10^{-3}$ моль/дм³ з межею виявлення $3,7 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³ за допомогою вольтамперометрії з лінійною розгорткою потенціалу. З кількох протестованих препаратів лише вітамін V_1 впливає на сигнал аналізу. Концентрації піридоксину у фармацевтичних препаратах з використанням запропонованого електроду та спектрофотометричного методу як методу порівняння, заснованого на реакції з N,N -діетил- n -фенілендіаміном, узгоджуються на рівні довірчого інтервалу 95% та в межах при-

йнятного діапазону похибок (Teixeira et al., 2004).

Описано одержання та застосування електроду з вугільної пасти, модифікованого комплексом ванадил (IV)–Сален для вольтамперометричного визначення піридоксину у фармацевтичних препаратах (Teixeira et al., 2004). Досліджено вплив рН, швидкості сканування робочого електроду та природи фонового електроліту. Вольтамперометрична поведінка модифікованого електроду була досліджена з використанням чотирьох різних фонових електролітів (фосфатний буфер, ацетатний буфер, KNO_3 і KCl). У фосфатному буферному розчині вольтамперометричний сигнал був відсутній і не спостерігалася окиснювально-відновного піку по відношенню до пари VO^{3+}/VO^{2+} як переносника електронів. Це пов'язано з тим, що катіон ванадилу (IV) осідає у вигляді фосфатної солі на поверхні електроду (Teixeira et al., 2004).

Для визначення піридоксину вперше було використано скло-вуглецевий електрод, модифікований тонкою одношліфною вуглецевою плівкою. Електрохімічна поведінка піридоксину свідчить про те, що модифікований електрод демонструє очевидну електрокаталітичну активність щодо окиснення піридоксину, оскільки він значно посилює піковий струм окиснення піридоксину, а також знижує його потенціал окиснення, зменшуючи величину поляризації. Після оптимізації експериментальних параметрів був розроблений вольтамперометричний метод для прямого визначення піридоксину. У порівнянні з іншими опублікованими методами, цей нещодавно запропонований метод має багато переваг, оскільки має дуже низьку межу виявлення, швидку реєстрацію, низьку вартість та простоту при використанні (Wanyun et al., 2004).

Для визначення вітаміну V_6 запропоновано простий і швидкий вольтамперометричний метод, заснований на використанні одноразових трафаретних електродів. Було проаналізовано вплив рН на вольтамперометричний сигнал. Оцінка лінійного діапазону концентраційної залежності ($2,0 \cdot 10^{-6}$ – $7,2 \cdot 10^{-5}$ М), функції калібрування, межі виявлення ($1,5 \cdot 10^{-6}$ М) та відтворюваності проводилася разом із визначенням можливих заважаючих сполук, присутніх у реальному зразку. Запропонована аналітична система була успішно застосована для визначення піридоксину в полівітамінних добавках, енергетичних напоях і сухих сні-

данках за допомогою стандартного методу добавок (Brunetti & Desimoni, 2014).

Під час окиснення піридоксину на вуглецево-керамічному електроді, модифікованому багатостінними вуглецевими нанотрубками отримали один необоротний анодний пік при $E_p = 716$ мВ. Електрохімічну поведінку піридоксину досліджували на отриманому електроді у фосфатному буферному розчині при рН=7,0. Циклічні вольтамперометричні дослідження показали, що процес окиснення є незворотним і контролюється дифузиею. На підставі аналізу вольтамперних кривих було розраховано кількість електронів, що беруть участь у процесі електроокиснення; одержані дані показали, що піридоксин окиснюється за допомогою двох одноелектронних стадій (Habibi et al., 2010).

Згідно з проведеними дослідженнями, піридоксин був виявлений у фармацевтичному препараті та зразках сечі людини за допомогою диференціальної імпульсної вольтамперометрії на немодифікованому електроді, легованому бором. У буферному розчині Бріттона-Робінсона при рН=6 V_6 забезпечує чітко виражений пік окиснення приблизно при +1,05 В в порівнянні з Ag/AgCl (3М KCl). Досліджено вплив інших речовин, присутніх у реальних зразках. Відтворюваність запропонованої методики, розрахована після 7 вимірювань при 9 і 30 мкМ V_6 , становила 3,6 і 2,4% відповідно. Запропонована аналітична методика є недорогою альтернативою до вже існуючих, яка була успішно застосована при визначенні V_6 в реальних препаратах (Kuzmanović et al., 2016).

Нещодавно було розроблено одночасний аналіз піридоксину та мелатоніну у складі таблеток за допомогою похідної ультрафіолетової спектроскопії, але проведений аналіз літератури не дає доказів вольтамперометричного визначення мелатоніну та вітаміну V_6 одночасно. У даній роботі описано просту аналітичну методику вибіркового визначення мелатоніну та вітаміну V_6 , поєднаних у таблетках. Визначення включає окиснення обох вітамінів методом диференціальної імпульсної вольтамперометрії на скло-вуглецевому електроді. Обидві речовини окиснюються, і для отримання необхідної селективності були потрібні два окремі прогони в різних фонових електролітах (Santander et al., 2001).

Мелатонін і вітамін V_6 можуть бути окиснені на скло-вуглецевому електроді;

одержано добре розділені анодні піки за допомогою диференціальної імпульсної вольтамперометрії. Вітамін V_6 демонструє піковий потенціал окиснення приблизно 650 мВ у порівнянні з аргент-хлоридним електродом в аміачному буферному розчині при рН=9, а мелатонін має піковий потенціал 840 мВ у порівнянні з аргент-хлоридним електродом в буферному розчині Бріттона-Робінсона при рН=2 (Santander et al., 2001).

Для електроаналітичного визначення піридоксину (вітаміну V_6) у фармацевтичних препаратах за допомогою циклічної вольтамперометрії використовувався електрод із вугільної пасти, модифікованої гексаціанофератом (III) ($CuHCF$). Були досліджені різні параметри для оптимізації реакції датчика, такі як склад електроду, фоновий розчин, вплив рН, швидкість сканування потенціалу та домішок. Оптиміальні умови були знайдені при електродному складі 20% $CuHCF$, 55% графіту та 25% мінерального масла в ацетатному буферному розчині (рН=5,5), що містить 0,05 моль/дм³ NaCl. Діапазон визначення вітаміну піридоксину був від $1,2 \cdot 10^{-6}$ до $6,9 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³. Методику було успішно застосовано для визначення вітаміну V_6 у фармацевтичних препаратах. Електрод із вугільної пасти, модифікований $CuHCF$, дав результати, які можна порівняти з результатами, отриманими за допомогою спектрофотометрії (Teixeira et al., 2003).

Розроблено просту та практичну методику визначення піридоксину на основі електрохімічно відновленого оксиду графену, модифікованого вуглецево-керамічним електродом. Завдяки унікальним електричним і структурним властивостям, цей електрод продемонстрував ефект посилення електрокаталітичного сигналу окиснення піридоксину. На основі цього дослідження було розроблено чутливий і простий вольтамперометричний метод для визначення піридоксину, що забезпечує широкий лінійний відгук у діапазоні концентрацій 1–70 мкМ з межею виявлення 0,3 мкМ. Розроблений електрод показав задовільні результати визначення піридоксину у фармацевтичних препаратах (Razmi et al., 2014).

Вольтамперометричне визначення піридоксину було успішно проведено диференціальною імпульсною вольтамперометрією із використанням $CoHCF$ модифікованого вуглецевого пастового електроду. Лінійний робочий діапазон був значно нижчим,

а межа виявлення була значно покращена, що дозволило більш чутливе виявлення піридоксину. Дуже низька межа виявлення та його висока чутливість дозволяють припустити, що модифікований електрод з вугільної пасти може діяти як електрохімічний датчик для визначення піридоксину в реальних зразках (Mekonnen et al., 2014).

Вперше проведено електрохімічний синтез наноструктури золота на поверхні електрода з вугільної пасти. Цей електрод використовувався як простий і чутливий електрохімічний датчик для визначення вітаміну B_6 . Коефіцієнт дифузії (D) та кінетичні параметри, такі як коефіцієнт перенесення електронів (α) та каталітична константа швидкості (k) для B_6 були визначені за допомогою електрохімічних методів. Метод циклічної вольтамперометрії показав, що реакція окиснення вітаміну B_6 є необоротним процесом який контролюється дифузійною при низьких швидкостях сканування. Використовуючи диференціальну імпульсну вольтамперометрію, піковий струм мав лінійну залежність від концентрації вітаміну B_6 в діапазонах 1,9–110,8 мкМ з межею виявлення 74,0 нМ відповідно. Результати показали, що інші вітаміни не впливають на окиснення B_6 . Диференціальна імпульсна вольтамперометрія була використана для кількісного визначення B_6 у деяких реальних зразках методом стандартних добавок. Модифікований електрод показав хорошу чутливість і стабільність (Dokur et al., 2021).

На сьогодні наноструктуровані поверхні електродів які отримуються за рахунок їх модифікації широко використовуються при дослідженні різноманітних окисно-відновних електрохімічних процесів кисневмісних органічних сполук. Такі електродні поверхні дозволяють отримувати певні економічні ефекти, які пов'язані із проходженням процесу деполяризації за рахунок підвищення селективності та чутливості електроду (Moustafa et al., 2022). Зростання інтенсивності процесу окиснення органічних сполук на металевих поверхнях можливе не тільки за рахунок зміни зовнішніх геометричних характеристик електроду, але й надання поверхні особливого стану. Наявність наноструктурованих елементів на поверхні електродів, на відміну від звичайних і пористих електродів, в силу специфічності їх будови призводить до інтенсифікації електрохімічних окисно-відновних процесів.

Проведені попередні дослідження продемонстрували, що модифіковані наночастинками платини електроди є досить ефективними електродними матеріалами при дослідженні окисно-відновних процесів амінокислот та вітамінів групи В (Shevchenko et al., 2011). Завдяки своїм кластерним розмірам, хорошій електропровідності поверхні та високій каталітичній активності, платинові наноструктури потенційно можуть бути використані при створенні електрохімічних сенсорів і біосенсорів, в яких вони ефективно працюють як електронні емітери, що переносять електрони між електродом і електрохімічно активними частинками, сприяючи кращому перенесенню електронів між поверхнею електродів та електролітом, тобто на межі існування подвійного електричного шару.

Матеріал і методи

Одержані нами наноструктуровані поверхні платини використані в якості електродних матеріалів при дослідженні електрохімічних процесів окиснення та відновлення вітамінів групи В. У даній роботі в якості деполяризатора використали вітамін B_6 . Окиснення піридоксину гідрохлориду проводили в кислому та лужному середовищі на фоні натрій перхлорату. Інтенсивність роботи виготовленого електроду порівнювали з процесом, що проходив на гладкому платиновому електроді. При проведенні експериментальних досліджень використали вольтамперометрію з лінійною та циклічною розгорткою потенціалу. Для одержання лінійних та циклічних вольтамперометричних кривих в роботі використовували вольтамперометричну установку на базі потенціостату ПИ-50-1 та програматора ПР-8. Методику проведення вольтамперометричних досліджень та характеристика електродів приведено в роботі (Шевченко та ін., 2023b).

Результати та обговорення

Електрохімічну поведінку нікелевого наноструктурованого електроду, модифікованого мікрокількостями платини, яку осаджували електрохімічним шляхом на вершини кластерних структур, вивчали в діапазоні рН від 2 до 9 у розчині, що містив $1 \cdot 10^{-3}$ М піридоксину гідрохлориду в 0,5 М фоновому розчині $NaClO_4$, при швидкості розгортки потенціалу $V = 0,05$ В/с. Кращу відтворюваність і форму вольтамперограм спостерігали при рН = 6,8. Графічна залежність анодного пікового струму як функції від різних значень

pH для досліджуваного деполяризатора на модифікованому платиновому електроді показано на рис. 1.

Анодний піковий струм зростає зі збільшенням pH від 2,0 до 7,0, а потім зменшувався при більш високих значеннях pH. При більш високих значеннях pH результати не були відтворюваними, вольтамперометричні криві за своєю формою наближалися до форми фонових кривих, особливо вище pH = 9,0.

Залежність вольтамперометричного пікового струму від прикладеного потенціалу як функції концентрації піридоксину зареєстровано в діапазоні від $1 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-4}$ М при оптимальних експериментальних умовах (рис. 2).

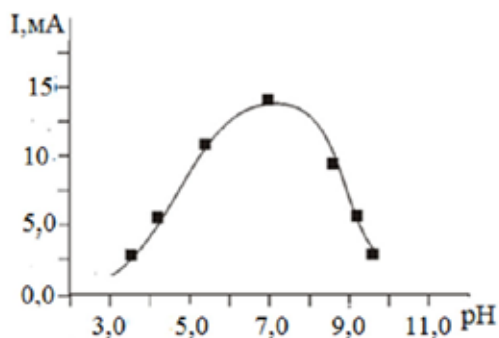


Рис. 1. Вплив зміни pH на анодний пік струму в розчині $1 \cdot 10^{-3}$ М піридоксину гідрохлориду на аноді із модифікованої платини ($V = 0,05$ В/с, фон – 0,5М, NaClO_4 , $T = 293$ К)

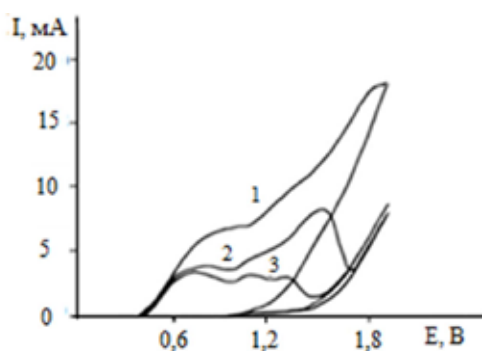


Рис. 2. Потенціодинамічні криві електрохімічного окиснення піридоксину гідрохлориду на фоні 0,5 М водного розчину NaClO_4 (pH=6,8, $V = 0,05$ В/с, $T=293$ К). Концентрація деполяризатора: 1. $1 \cdot 10^{-3}$ М; 2. $5 \cdot 10^{-4}$ М; 3. $1 \cdot 10^{-4}$ М.

На одержаних вольтамперометричних кривих спостерігається два анодних максимуми струму в області потенціалів 0,9 та 1,25 В по відношенню до аргент-хлоридного насиченого електроду порівняння. Потенціали напівхвилі відповідно склали 0,84 – 1,06 В.

Порівнюючи потенціодинамічні криві електроокиснення піридоксину гідрохлориду на гладкому та наноструктурованому платиновому електроді, було встановлено, що величина потенціалів для граничного струму при еквімолярних концентраціях вітаміну B_6 для електроду з розвиненою поверхнею має менш позитивне значення потенціалу розряду. Різниця в значеннях потенціалів складає 0,1 В. Співвідношення між силами струму максимумів для наноструктурованого та гладкого платинових електродів, при однаковій концентрації деполяризатора складає 1,35, отже, інтенсивність процесу розряду піридоксину гідрохлориду на наноструктурованому платиновому електроді практично у півтора рази вища. Для другого максимуму струму спостерігалася лінійна залежність від концентрації піридоксину гідрохлориду в межах $1 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-3}$ моль/дм³ (рис. 3).

Вплив швидкості розгортки потенціалу на електрохімічний процес окиснення вітаміну B_6 досліджували методом циклічної вольтамперометрії. Як показано на рис. 4, зі зростанням швидкості розгортки потенціалу максимум піку окиснення стає більш позитивним, підтверджуючи наявність кінетичних обмежень електрохімічної реакції. Це свідчить про те, що при досить високій перенапрузі процес контролюється

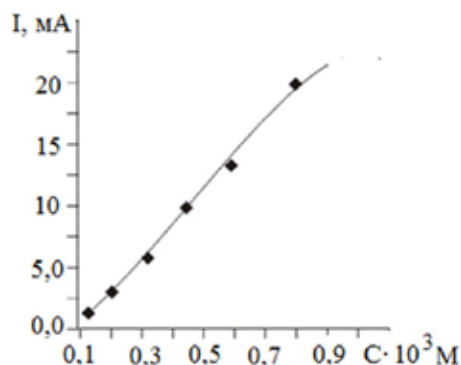


Рис. 3. Калібрувальна крива для визначення піридоксину в 0,5 М водного розчину NaClO_4 з pH = 6,8 при $V = 0,05$ В/с, $T=293$ К

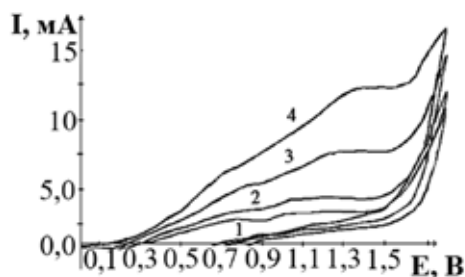


Рис. 4. Циклічні вольтамперометричні криві окиснення $1 \cdot 10^{-3}$ М піридоксину гідрохлориду на фоні 0,5 М водного розчину NaClO_4 ($\text{pH}=6,8, T=293\text{K}$). Швидкість накладання потенціалу: 1. 0,01; 2. 0,02; 3. 0,05; 4. 0,1 В/с

дифузією. В цілому досліджуваний процес необоротний, що впливає із форми циклічних вольтамперометричних кривих та розрахованих діагностичних критеріїв. Встановлено, що лімітуючою стадією електродного процесу є дифузія – при низькій швидкості та адсорбція – при високій швидкості сканування потенціалу.

Одержана графічна залежність висоти піку максимуму струму (I_m) від квадратного кореня швидкості розгортки потенціалу ($v^{1/2}$) виявилася лінійною в інтервалі 0,01–0,1 $\text{В} \cdot \text{с}^{-1}$ (рис. 5), що вказує на необоротність процесу. Розрахунок параметрів необоротності (нахил прямих у координатах ($dE_m/d\lg V = 0,115 \text{ В}$; $dE_m/d\lg I_m = 0,128 \text{ В}$), близький до теоретичного значення (0,118) що дає змогу також стверджувати, що процес окиснення деполаризатора протікає необоротно.

Відношення тангенсів кутів нахилу прямих в координатах $E_m - \lg V$ (потенціал анод-

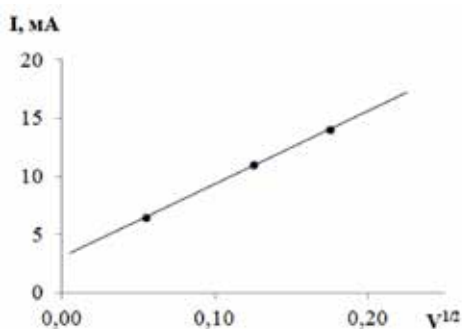


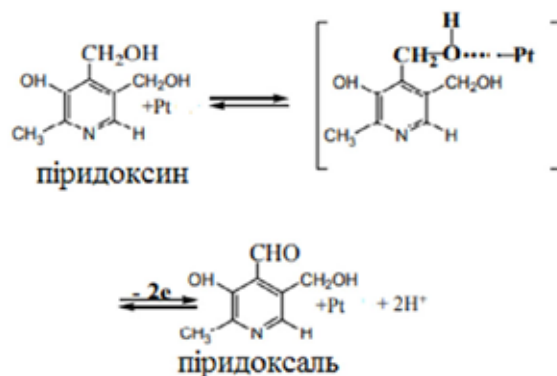
Рис. 5. Залежність ($I_m - v^{1/2}$), отримана при окисненні $1 \cdot 10^{-3}$ М піридоксину гідрохлориду на фоні 0,5 М водного розчину NaClO_4 ($\text{pH}=6,8; T=293\text{K}$)

ного максимуму – логарифма швидкості розгортки потенціалу склав 0,89). Для оборотних процесів ця величина рівна двом. Отже, процес є необоротним (рис. 6).

Для того, щоб отримати інформацію щодо кількості електронів, що беруть участь у досліджуваному процесі, будували залежність $E_m - \lg V$, використовуючи дані з висхідних гілок потенціодинамічних кривих, знятих при швидкості розгортки потенціалу 20 $\text{мВ} \cdot \text{с}^{-1}$ (див. рис. 6). Оцінка нахилу графічної залежності E_m від $\lg V$ дає величину 0,613. Ці результати вказують, що в окисненні вітаміну B_6 беруть участь два електрони. Це також підтверджується формою вольтамперної кривої.

Число електронів, що беруть участь в електродному процесі, розраховували за відомим рівнянням граничного струму Левіча; їх кількість рівна 2,18.

Отже, процес окиснення піридоксину на платиновому наноструктурованому електроді можна подати наступною схемою:



Відомо, що швидкість електрохімічних реакцій, як і константа швидкості, в тому числі і у випадку електрохімічного окис-

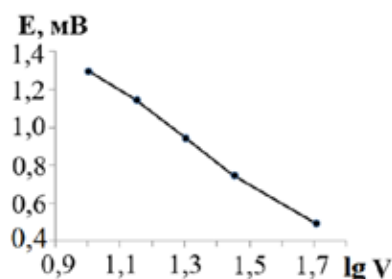


Рис. 6. Залежність ($E_m - \lg V$), отримана в розчинах піридоксину гідрохлориду в межах концентрацій ($1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-4}$ М) на фоні розчину NaClO_4

нення вітамінів, зі зростанням температури збільшується. У результаті проведених досліджень підвищення температури призводить до зростання граничних струмів окиснення із частковою поляризацією процесу та константи швидкості гетерогенного процесу.

Підвищення температури на кожні 10 градусів в наших дослідженнях призвело до зростання анодних струмів максимумів в 1,6–1,8 разів на вольтамперометричних кривих. При цьому відбувається зміщення потенціалу розряду деполяризатора в анодну область майже на 70 мВ. Хід одержаних кривих та зростання перенапруги в першу чергу обумовлюється пониженням адсорбуючої здатності піридоксину гідрохлориду при зростанні температури, що підпорядковується теорії адсорбційних процесів (рис. 7).

Відомо, що швидкість електрохімічного процесу, як і енергії активації E_a залежить від потенціалу розряду деполяризатора на поверхні робочого електроду, який, в свою

чергу, теж є залежним від температури, та складу розчину (рис. 8).

Розрахована за напівлогарифмічною залежністю $\ln I - 1/T$ енергія активації електрохімічного окиснення піридоксину має «уявну» величину, яка характеризує процесу лише при певному потенціалі ΔE_a складала $\Delta E_a = 29,4 \pm 0,2$ кДж/моль.

За результатами аналізу одержаних вольтамперометричних кривих провели розрахунок константи швидкості та коефіцієнта дифузії процесу окиснення деполяризатора на наноструктурованому платиновому електроді (табл. 1).

Висновки

Використаний вольтамперометричний метод із лінійною та циклічною розгорткою потенціалу на наноструктурованих поверхнях платини є хорошою альтернативою для аналітичного визначення B_6 , оскільки він простий, дешевий і має низьку межу виявлення, а також має достатню точність і чутливість. Межа виявлення становить $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³.

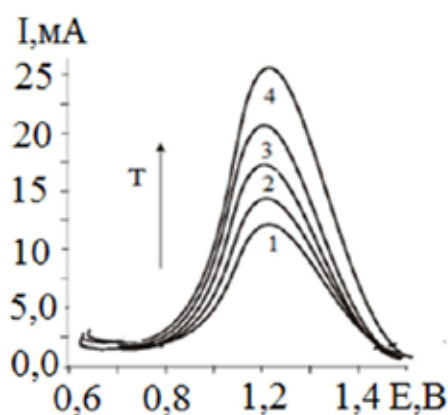


Рис. 7. Залежність сили струму анодного максимуму від температури досліджуваного розчину деполяризатора: (рН= 6,8; V=0,05 В/с; C = $0,5 \cdot 10^{-3}$ М) 1. 293; 2. 303; 3. 313; 4. 323К

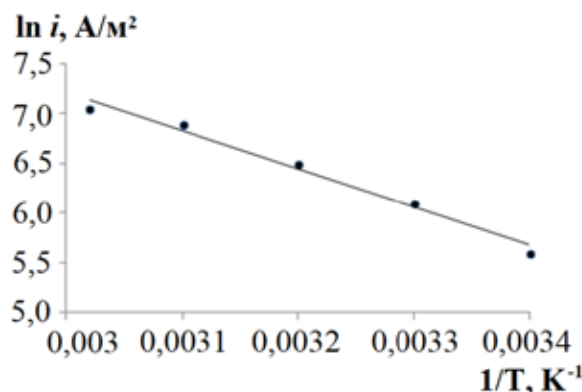


Рис. 8. Напівлогарифмічна залежність густини струму від оберненої температури для процесу окиснення піридоксину на платиновому модифікованому електроді (рН= 6,8; V= 0,05 В/с; C = $0,5 \cdot 10^{-3}$ М)

Таблиця 1

Експериментально одержані кінетичні параметри процесу електрохімічного окиснення піридоксину гідрохлориду на наноструктурованому платиновому електроді

Деполяризатор	Константа швидкості, k_s (см \cdot с $^{-1}$)	Коефіцієнт дифузії, D (м 2 /с)
Піридоксин	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$9,4 \cdot 10^{-12}$

Список використаних джерел

Мартинюк М.В., Шевченко О.П., Лут О.А., Пасічник В.В. Електрохімічне відновлення нікотинаміду на масивах гострійних структур нікелю з додатково осадженим бісмутом. *Сучасні проблеми хімії* : Зб. матеріалів XXI Міжнар. конф. студентів, аспірантів та молодих вчен., м. Київ, 17–19 трав. 2023 р. С. 139.

Шевченко О.П., Лут О.А., Шафорост Ю.А., Погребняк О.С. Вольтамперометричні дослідження електроокиснення пірокатехіну на платиновому наноструктурованому електроді. «Молекулярна інженерія та комп'ютерне моделювання для нано- і біотехнологій: від наноелектроніки до біополімерів»: Зб. тез міжнар. наук. інтернет-конф., м. Черкаси, 27–28 верес. 2023 р. Черкаси, 2023. С. 122.

Шевченко О.П., Лут О.А., Шафорост Ю.А., Шкунида Д. П. Електрохімічні дослідження процесу відновлення тіамін броміду на нікелевих гострійних структурах модифікованих нанорозмірними частинками бісмуту. *Український журнал природничих наук*. 2023. № 5. С. 80–89. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.9>.

Шевченко О.П., Сосюк О.В. Дослідження процесу електрохімічного окиснення піридоксину гідрохлориду на платиновому модифікованому електроді. *Шляхи розвитку науки в сучасних кризових умовах*: Матеріали IV Міжнар. науково-практ. Інтернет-конф., м. Дніпро, 8–9 черв. 2023 р. С. 452.

Brunetti B., Desimoni E. Voltammetric determination of vitamin B₆ in food samples and dietary supplements. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2014. Vol. 33. P. 155–160. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2013.12.008>.

David I.G., Florea M.A., Cracea O.G., Popa D.E., Buleandra M., Iorgulescu E.E., David V., Badea I.A., Ciucu A.A. Voltammetric determination of B1 and B6 vitamins using a pencil graphite electrode. *Chem. Pap.*, 2015. Vol. 69. P. 901–910. <https://doi.org/10.1515/chempap-2015-0096>.

Dokur E., Gorduk O., Sahin Y. Cost-effective and facile production of a phosphorus-doped graphite electrode for the electrochemical determination of pyridoxine. *Electroanalysis*, 2021. Vol. 33 (6). P. 1657–1667. <https://doi.org/10.1002/elan.202100038>.

Habibi B., Phezghan H., Pournaghi-Azar M.H. Voltammetric determination of vitamin B₆ (Pyridoxine) using multi wall carbon nanotube modified carbon-ceramic electrode. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 2010. Vol. 7. P. 103–112. <https://doi.org/10.1007/BF03246189>.

Kuzmanović D., Khan M., Mehmeti E., Nazir R., Amaizah N.R.R., Stanković D.M. Determination of pyridoxine (vitamin B₆) in pharmaceuticals and urine samples using unmodified boron-doped diamond electrode. *Diamond and Related Materials*, 2016. Vol. 64. P. 184–189. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2016.02.018>.

Mehdi Motaghi M., Beitollahi H., Tajik S., Hosseinzadeh R. Nanostructure Electrochemical Sensor for Voltammetric Determination of Vitamin C in the Presence of Vitamin B₆: Application to Real Sample Analysis. *International Journal of Electrochemical Science*, 2016. P. 7849–7860. <https://doi.org/10.20964/2016.09.60>.

Mekonnen A., Saini R. C., Tadese A., Pal R. Square wave voltammetric determination of pyridoxine in pharmaceutical preparations using cobalt hexacyanoferrate modified carbon paste electrode. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 2014. Vol. 6. P. 544–551.

Moustafa A., El-Kamel R.S., Abdelgawad S., Fekry A.M., Shehata M. Electrochemical determination of vitamin B₆ (pyridoxine) by reformed carbon paste electrode with iron oxide nanoparticles. *Ionics* 28, 2022. P. 4471–4484. <https://doi.org/10.1007/s11581-022-04673-6>.

Razmi H., Jabbari M., Mohammad-Rezaei R. Electrochemically Reduced Graphene Oxide Modified Carbon Ceramic Electrode for the Determination of Pyridoxine. *Analytical Chemistry Letters*, 2014. 4 (2). P. 73–85. <https://doi.org/10.1080/22297928.2014.925826>.

Santander P., Nuñez-Vergara L.J., Sturm, J.C., Squella J.A. Voltammetric determination melatonin and pyridoxine (vitamin B₆) in tablets. *Bol. Soc. Chil. Quím.*, 2001. Vol. 46. P. 1840–1845. <http://dx.doi.org/10.4067/S0366-16442001000200005>.

Shevchenko O., Lut O., Aksimentyeva O. Highly sensitive sensor for detection of vitamin B₁ on the nanostructural surface of nickel. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. 2011. T. 2 (8). № 1. P. 69–73.

Teixeira M.F., Segnini A., Moraes F.C., Marcolino-Júnior L.H., Fatibello-Filho O., Cavalheiro É.T. Determination of vitamin B₆ (pyridoxine) in pharmaceutical preparations by cyclic voltammetry at a copper(II) hexacyanoferrate(III) modified carbon paste electrode. *J. Braz. Chem. Soc.* 2003. Vol. 14. P. 316–321. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-50532003000200021>.

Teixeira M.F.S, Marino G., Dockal E.R., Cavalheiro É.T.G. Voltammetric determination of pyridoxine (Vitamin B₆) at a carbon paste electrode modified with vanadyl(IV)–Salen complex. *Analytica Chimica Acta*. 2004. 508, 1. P. 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2003.11.046>.

Wanyun Q., Kangbing W., Shengshui H. Voltammetric determination of pyridoxine (Vitamin B₆) by use of a chemically-modified glassy carbon electrode. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*. 2004. Vol. 36. P. 631–635. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2004.07.016>.

References (translated & transliterated)

- Martynjuk, M.V., Shevchenko, O.P., Lut, O.A., & Pasichnyk, V.V. (2023). Elektrokhimichne vidnovlennja nikotynamidu na masyvakh ghostrijnykh struktur nikelju z dodatkovy osadzenym bismutom [Electrochemical reduction of nicotinamide on arrays of nickel acicular structures with additionally deposited bismuth]. *Suchasni problemy khimiji [Modern problems of chemistry]* : Collection of materials of the XXI International Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, Kyiv, 17–19 May, 139 [in Ukrainian].
- Shevchenko, O.P., Lut, O.A., Shaforost, Ju.A., & Poghrebnyak, O.S. (2023). Voljtamperometrychni doslidzhennja elektrookysnennja pirokatekhinu na platynovomu nanostrukturovanomu elektrodi [Voltammetric studies of pyrocatechin electrooxidation on a platinum nanostructured electrode]. «*Molekuljarna inzhenerija ta komp'juterne modeljuvannja dlja nano- i biotekhnologij: vid nanoelektroniky do biopolimeriv*» [«*Molecular engineering and computer modelling for nano- and biotechnology: from nanoelectronics to biopolymers*»] : Collection of abstracts of the international scientific Internet conference, Cherkasy, 27–28 Sept., 122 [in Ukrainian].
- Shevchenko, O.P., Lut, O.A., Shaforost, Ju.A., & Shkunyda, D.P. (2023). Elektrokhimichni doslidzhennja procesu vidnovlennja tiaminbromidu na nikelovykh ghostrijnykh strukturakh modyfikovanykh nanorozmirnymy chastynkamy bismutu. [Electrochemical studies of the thiamine bromide reduction process on nickel sharp structures modified with nanoscale bismuth particles]. *Ukrainskyj zhurnal pryrodnychykh nauk [Ukrainian Journal of Natural Sciences]*, 5, 80–89. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.9> [in Ukrainian].
- Shevchenko, O.P., & Sosjuk, O.V. (2023). Doslidzhennja procesu elektrokhimichnogho okysnennja pirydoksynu ghidrokhloridu na platynovomu modyfikovanomu elektrodi [Study of the process of electrochemical oxidation of pyridoxine hydrochloride on a platinum modified electrode]. *Shljakhy rozvytku nauky v suchasnykh kryzovykh umovakh [Ways of development of science in modern crisis conditions]* : Materials of the IV International scientific and practical Internet conference, Dnipro, 8–9 Jun., 452 [in Ukrainian].
- Brunetti, B., & Desimoni, E. (2014). Voltammetric determination of vitamin B₆ in food samples and dietary supplements. *Journal of Food Composition and Analysis*, 33, 155–160. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2013.12.008> [in English].
- David, I.G., Florea, M.A., Cracea, O.G., Popa, D.E., Buleandra, M., Iorgulescu, E.E., David, V., Badea, I.A., & Ciucu, A.A. (2015). Voltammetric determination of B1 and B6 vitamins using a pencil graphite electrode. *Chem. Pap.*, 69, 901–910. <https://doi.org/10.1515/chempap-2015-0096> [in English].
- Dokur, E., Gorduk, O., & Sahin, Y. (2021). Cost-effective and facile production of a phosphorus-doped graphite electrode for the electrochemical determination of pyridoxine. *Electroanalysis*, 33 (6), 1657–1667. <https://doi.org/10.1002/elan.202100038> [in English].
- Habibi, B., Phezhhan, H., & Pournaghi-Azar, M.H. (2010). Voltammetric determination of vitamin B₆ (Pyridoxine) using multi wall carbon nanotube modified carbon-ceramic electrode. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 7, 103–112. <https://doi.org/10.1007/BF03246189> [in English].
- Kuzmanović, D., Khan, M., Mehmeti, E., Nazir, R., Amaizah, N.R.R., & Stanković, D.M. (2016). Determination of pyridoxine (vitamin B₆) in pharmaceuticals and urine samples using unmodified boron-doped diamond electrode. *Diamond and Related Materials*, 64, 184–189. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2016.02.018> [in English].
- Mehdi Motaghi, M., Beitollahi, H., Tajik, S., & Hosseinzadeh, R. (2016). Nanostructure Electrochemical Sensor for Voltammetric Determination of Vitamin C in the Presence of Vitamin B₆: Application to Real Sample Analysis. *International Journal of Electrochemical Science*, 7849–7860. <https://doi.org/10.20964/2016.09.60> [in English].
- Mekonnen, A., Saini, R. C., Tadese, A., & Pal, R. (2014). Square wave voltammetric determination of pyridoxine in pharmaceutical preparations using cobalthexacyanoferrate modified carbon paste electrode. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 6, 544–55 [in English].
- Moustafa, A., El-Kamel, R.S., Abdelgawad, S., Fekry, A.M., & Shehata, M. (2022). Electrochemical determination of vitamin B₆ (pyridoxine) by reformed carbon paste electrode with iron oxide nanoparticles. *Ionics* 28, 4471–4484. <https://doi.org/10.1007/s11581-022-04673-6> [in English].
- Razmi, H., Jabbari, M., & Mohammad-Rezaei, R. (2014). Electrochemically Reduced Graphene Oxide Modified Carbon Ceramic Electrode for the Determination of Pyridoxine. *Analytical Chemistry Letters*, 4 (2), 73–85. <https://doi.org/10.1080/22297928.2014.925826> [in English].

Santander, P., Nuñez-Vergara, L.J., Sturm, J.C., & Squella, J.A. (2001). Voltammetric determination of melatonin and pyridoxine (vitamin B₆) in tablets. *Bol. Soc. Chil. Quím*, 46, 1840–1845. <http://dx.doi.org/10.4067/S0366-16442001000200005> [in English].

Shevchenko, O., Lut, O., & Aksimentyeva, O. (2011). Highly sensitive sensor for detection of vitamin B₁ on the nanostructural surface of nickel. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 2 (8), № 1, 69–73 [in English].

Teixeira, M.F., Segnini, A., Moraes, F.C., Marcolino-Júnior, L.H., Fatibello-Filho, O., & Cavalheiro, É.T. (2003). Determination of vitamin B₆ (pyridoxine) in pharmaceutical preparations by cyclic voltammetry at a copper (II) hexacyanoferrate (III) modified carbon paste electrode. *J. Braz. Chem. Soc.*, 14, 316–321. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-50532003000200021> [in English].

Teixeira, M.F.S, Marino, G., Dockal, E.R., & Cavalheiro, É.T. (2004). Voltammetric determination of pyridoxine (Vitamin B₆) at a carbon paste electrode modified with vanadyl (IV)–Salen complex. *Analytica Chimica Acta*, 508 (1), 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2003.11.046> [in English].

Wanyun, Qu, Kangbing, Wu, & Shengshui, Hu. (2004). Voltammetric determination of pyridoxine (Vitamin B₆) by use of a chemically-modified glassy carbon electrode. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*, 36, 631–635. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2004.07.016> [in English].

Отримано: 22.04.2024

Прийнято: 29.04.2024



АГРОНОМІЯ

УДК 579.64:632.4:633.11

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.19>

ФОРМУВАННЯ ПОПУЛЯЦІЙ ФІТОПАТОГЕНІВ У ЛИСТКОВОМУ МІКОБІОМІ РОСЛИН ЯЧМЕНЮ ЯРОГО

Л. В. Гаврилюк¹, І. В. Безноско², Т. М. Горган³, А. М. Ліщук⁴

Добір сортів злакових культур, як чинника регуляції фітопатогенного мікробіому в агроценозах, є актуальним напрямком досліджень, тому що це призводить до зниження забруднення агроценозів інфекційними структурами патогенів. У статті представлені результати добору сортів рослин ячменю ярого за розробленими показниками: щільність популяції мікроміцетів, частота трапляння видів та інтенсивність споруутворення. Досліджували видовий спектр мікроміцетів у листковому мікробіомі рослин ячменю ярого за різних технологій вирощування. За інтенсивної технології вирощування рослин у листковому мікробіомі досліджуваних сортів ячменю ярого біорізноманіття видів мікроміцетів була меншою ніж в умовах органічної технології вирощування, але частота трапляння видів мікроміцетів істотно вищою, що свідчить про більшу конкуренцію видів між собою. Досліджували листковий мікробіом рослин ячменю ярого сортів Саломі та Себастьян, які вирощувались в умовах інтенсивної та органічної технології. Відбирали листки зазначених сортів рослин у фази: кущання, виходу у трубку та колосіння. Щільність

¹ доктор філософії, старший науковий співробітник
(Інститут агроєкології і природокористування
Національної академії аграрних наук України, м. Київ)
e-mail: gavriluklilia410@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6901-0766

² кандидат біологічних наук, в.о. завідувача лабораторії
(Інститут агроєкології і природокористування
Національної академії аграрних наук України, м. Київ)
e-mail: beznoskoirina@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2217-5165

³ науковий співробітник лабораторії біоконтролю
агроєкосистем і органічного виробництва
(Інститут агроєкології і природокористування
Національної академії аграрних наук України, м. Київ)
e-mail: tanja.micaela@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8980-7895

⁴ кандидат сільськогосподарських наук,
старший науковий співробітник
лабораторії біоконтролю агроєкосистем і органічного виробництва
(Інститут агроєкології і природокористування
Національної академії аграрних наук України, м. Київ)
e-mail: lishchukallan@gmail.com
ORCID: 0000-0002-8339-9365

популяції фітопатогенів на листковому мікобіомі визначали методом змиву і поверхневого посіву суспензії на поживні середовища Чапека та КГА (картопляно-глюкозний агар). Визначено, що за інтенсивної та органічної технології вирощування рослин у листковому мікобіомі ячменю ярого сорту Саломі відбулося зниження щільності популяції, частоти трапляння видів мікроміцетів та їхньої інтенсивності спорування у порівнянні із рослинами ячменю ярого сорту Себастьян. Це свідчить, що вирощування рослин ячменю ярого зазначених сортів здатне стримувати формування популяції фітопатогенів, що забезпечить зниження забруднення агроценозів інфекційними структурами патогенів та підвищить безпечність рослинної продукції.

Ключові слова: забруднення, інфекційні структури, щільність популяції, частота трапляння видів, інтенсивність спорування, мікроміцети, добір сортів.

FORMATION OF PHYTOPATHOGENS POPULATIONS IN THE LEAF MICROBIOME OF SPRING BARLEY PLANTS

L. V. Havryliuk, I. V. Beznosko, T. M. Gorgan, A. M. Lischuk

The selection of varieties of cereal crops as a factor in the regulation of the phytopathogenic mycobiome in agrocenoses is an actual direction of research, because it leads to reduce contamination of agrocenoses with infectious structures of pathogens. The article presents the results of the selection of spring barley plant varieties based by to the developed indicators: the population density of micromycetes, the frequency of occurrence of species and the intensity of sporulation. The species spectrum of micromycetes in the leaf mycobiome of the spring barley plant under different cultivation technologies was studied. Under the intensive technology of growing plants in the leaf microbiome of the investigated varieties of barley, the spring biodiversity of micromycete species was less than under the conditions of organic cultivation technology, but the frequency of occurrence of micromycete species was significantly higher, which indicates greater competition between species. The leaf mycobiome of spring barley plants of the Salomi and Sebastian varieties, which were grown under conditions of intensive and organic technologies, was studied. The leaves of the specified varieties of plants were selected in the phases: tillering, emerging into a tube and earing. The population density of phytopathogens on the leaf mycobiome was determined by the method of washing and surface sowing of the suspension on Czapek's and KGA (potato-glucose agar) nutrient media. It was determined that under the intensive and organic technology of growing plants in the leaf mycobiome of Salomi spring barley, there was a decrease in population density, the frequency of occurrence of micromycete species and their intensity of sporulation in comparison with Sebastian spring barley plants. This indicates that the cultivation of spring barley plants of the specified varieties is able to restrain the formation of phytopathogen populations, which will ensure a reduction in the contamination of agrocenoses by infectious structures of pathogens and increase the safety of plant products.

Key words: pollution, infectious structures, population density, frequency of occurrence of species, intensity of sporulation, micromycetes, variety selection.

Вступ

Взаємодія популяцій фітопатогенних мікроорганізмів із рослинами злакових культур призводить до формування фітопатогенного мікобіому, який є чинником біологічного забруднення в агроценозах (O'Brien, 2017; Van Montagu, 2020). Часте використання хімічних засобів захисту рослин, вирощування стійких до хвороб сортів рослин та зміна погодних умов призводить до розширення видового складу фітопатогенів, інтенсивного поширення нових видів із високою агресивністю. Це сприяє виникненню епіфітотій в агрофітоценозах та призводить до зниження біобезпеки виробництва рослинної сировини злакових культур. Тому, дослідження як вітчизняних, так і іно-

земних авторів спрямовано на вивчення причин порушення природних зв'язків між культурою і фітопатогеном та з'ясуванню механізмів, які здатні стримувати формування чисельності фітопатогенних структур в агроценозах злакових культур (Köhl et al, 2019).

У сучасних змінах кліматичних умов багато досліджень напрямлено на вивчення вологості та температурного режиму повітря впродовж вегетаційного періоду рослин, що є важливим чинником регуляції формування чисельності популяцій фітопатогенів за використання природних ресурсів (Парфенюк і Волощук, 2016; Парфенюк, 2017; Швартау та ін., 2017; Вожегова, Коковіхін, 2018). Зміна ґрунтово-кліматич-

них умов та інтенсивне використання хімічних засобів захисту призвело до поширенню видового складу популяцій фітопатогенів та накопичення їхніх структур на листках, колосках, коренях і насінні (Lamichhane, 2017; Безноско та ін., 2022). Адже відомо, що сорт рослин, який створений шляхом генетичного модифікування та стійкий до комплексу хвороб є потужним чинником спрямованого добору в популяціях фітопатогенів, а сприйнятливий сорт рослин впливає на ріст популяцій (Петренкова та ін., 2016; Ngoune, Shelton, 2020; Безноско та ін., 2022). Вони значною мірою впливають на підвищення репродуктивного фону фітопатогенів, що погіршує умови агрофітоценозів і біобезпеку агроценозів (Reinhold-Hurek et al., 2015; Дерменко, 2016; Мостов'як та ін., 2020; Безноско та ін., 2021). Тому важливим є вивчення формування популяцій фітопатогенів у листовому мікобіомі рослин злакових культур в умовах різних технологій вирощування з урахуванням ґрунтово-кліматичних умов.

Щільність популяції фітопатогенів є важливим показником екологічного оцінювання злакових рослин, що дає можливість з'ясувати чисельність колонієутворюючих одиниць на вегетативних органах рослин (листках, колосках) за впливу абіотичних чинників. Частоти трапляння видів фітопатогенів мікроміцетів в мікобіомі листків рослин, дозволяє виявити домінантні види та їхню здатність траплятися в агроценозах злакових культур. Інтенсивність спорування мікроміцетів на листках рослин сортів злакових культур є екологічним показником вибраккування сортів, які здатні стимулювати розвиток фітопатогенів або добору таких сортів, які здатні стримувати їхній розвиток (Barratt et al., 2018; Терновий та ін., 2018). Отже, дослідження формування популяцій мікроміцетів у листовому мікобіомі злакових культур є пріоритетним напрямком наукових досліджень.

Оцінювання сортів рослин як чинника регуляції фітопатогенного мікобіому в агроценозах злакових культур, забезпечить зниження рівня забруднення інфекційними структурами патогена та підвищить безпечність рослинної сировини (Безноско та ін., 2023).

Матеріал та методи

Лабораторні дослідження проведено у лабораторії біоконтролю агроєкосистем та органічного виробництва Інституту агроєкології і природокористування НААН впродовж 2020–2022 рр. Визначено формування популяції фітопатогенів у листовому мікобіомі ячменю ярого сортів Саломі та Себастьян в умовах інтенсивної та органічної технології вирощування рослин.

Полові дослідження проведено на полях Сквирської дослідної станції органічного виробництва ІАН НААН згідно із загально-визнаними методиками, де листки рослин ячменю ярого обох сортів відбирали у різні фази онтогенезу (кущення, виходу у трубки та колосіння).

Відомо, що на поширення і розвиток фітопатогенів на листках сортів рослин впливає кількість опадів і температура повітря. Гідротермічний коефіцієнт (ГТК) є показником цих факторів. Впродовж 2020–2022 рр. вегетаційного періоду рослин ячменю ярого визначено ГТК, який представлений в таблиці 1.

В умовах інтенсивної технології вирощування використовували хімічні засоби захисту рослин, водночас в умовах органічної технології не використовували препаратів (табл. 2).

Щільність популяції фітопатогенів на листовому мікобіомі визначали методом змиву і поверхневого посіву суспензії на поживні середовища Чапека та КГА (картопляно-глюкозний агар). Чисельність фітопатогенів виражали у колонієутворюючих одиницях (КУО) на 1 г рослинної сировини

Таблиця 1
Гідротермічний коефіцієнт впродовж вегетаційного періоду 2020–2022 рр.

Рік	Місяць						Середнє значення ГТК
	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	
2020	1,22	1,81	1,04	0,81	0,73	0,54	1,23
2021	0,81	2,03	1,63	0,92	1,06	0,63	1,18
2022	0,62	1,74	0,92	0,63	0,37	0,42	0,78

Примітка: ГТК ≥ 1 – достатнє зволоження; ГТК 0,8–1,0 – помірне зволоження; ГТК 0,6–0,7 – недостатнє зволоження.

Таблиця 2

Схема захисту рослин ячменю ярого за різних технологій вирощування

Технологія вирощування	Період використання фунгіциду	Назва препарату	Діюча речовина	Норма витрати
Інтенсивна	передпосівне протруювання насіння	Вітавакс 200 ФФ	Карбоксин: 200 г/л Тирам: 200 г/л	3,0 л/т
	кущення	Гранстар Голд 75 (ФМС)	Трибенурон-метил: 562,5 г/кг, тифенсульфурон-метил: 187,5 г/кг	25 г/га
Органічна	Без внесення препаратів			

та визначали за ДСТУ 7847:2015 (ДСТУ 7847:2015, 2016).

Показник частоти трапляння (%) видів фітопатогенів визначали за формулою (Sessitsch et al., 2021):

$$A = \frac{B \times 100\%}{C}$$

де А – частота трапляння видів; В – кількість зразків, у яких виявлено цей вид; С – загальна кількість виділених видів.

Ідентифікацію ізолятів фітопатогенів до роду та виду здійснювали на біологічному мікроскопі DN-200D за визначниками (Marin-Felix et al., 2017; Gostinčar, 2020; Ruytinx et al., 2021) та застосовуючи онлайн базу даних «MusoBank». Показник інтенсивності спороутворення мікроміцетів визначали шляхом підрахунку конідій у камері Горяєва-Тома за формулою:

$$N = (a \times 1000/h \times S) \times n,$$

де N – кількість клітин в одному мл суспензії; а – середня кількість клітин в квадраті решітки; h – глибина камери (0,1 мм);

S – площа квадрата сітки (0,04 мм²); n – розведення вихідної суспензії.

Для статистичної обробки експериментальних даних застосовували однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA, тест Тьюки). Різниця між контрольними і експериментальними показниками вважалася значною, коли ймовірність різниці становила P<0.05.

Результати та обговорення

Досліджували щільність популяції мікроміцетів у листковому мікобіомі рослин ячменю ярого за різних технологій вирощування. Впродовж років дослідження за інтенсивної технології вирощування рослин щільність популяції мікроміцетів у листковому мікобіомі ячменю ярого обох сортів істотно зростала у фазу колосіння і була в межах від 7,8 до 22,3 тис КУО/г рослинної сировини (рис. 1).

Щільністю популяції фітопатогенів у листковому мікобіомі рослин ячменю ярого обох сортів у фазу виходу у трубку зменшувалася і коливалася від 3,2 до 7,4 тис КУО/г зеленої маси рослин. Це свідчить, що вне-

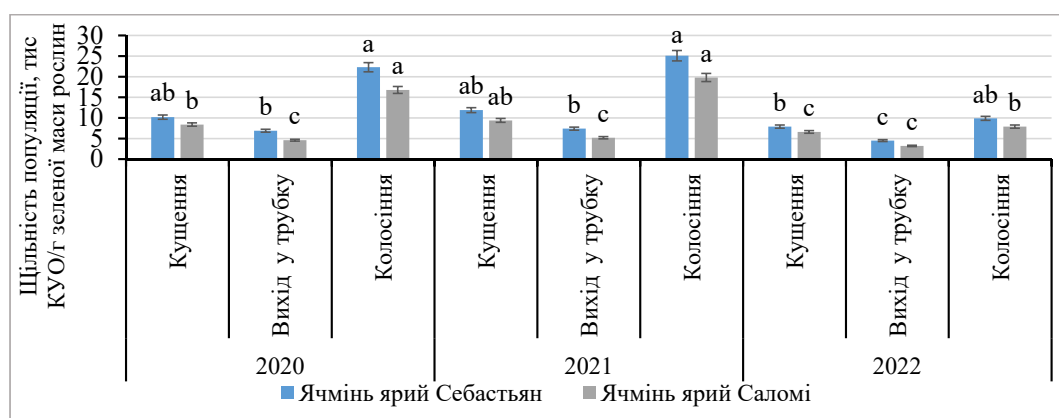


Рис. 1. Щільність популяцій фітопатогенів у листковому мікобіомі різних сортів ячменю ярого за інтенсивної технології вирощування ($x \pm SD$, Тьюкі тест, n = 5 повторів); а, b, с – статистично значущі відмінності кількості мікроорганізмів (P < 0.05)

сення хімічних препаратів у фазу кущення знижувало щільність популяції фітопатогенів у фазу виходу у трубку.

За органічної технології вирощування щільність популяції мікроміцетів у листковому мікrobiомі рослин ячменю ярого обох сортів була в 2 рази нижчою порівняно із інтенсивною технологією і зростала поступово до кінця вегетаційного періоду (рис. 2).

У листковому мікrobiомі рослин ячменю ярого сорту Себастьян щільність популяції мікроміцетів коливалась від 4,9 до 15,1 тис КУО/г рослинної сировини. Водночас, у листовому мікrobiомі рослин ячменю ярого сорту Саломі щільність популяції фітопатогенів була у межах від 3,6 до 10,8 тис КУО/г рослинної сировини. Це свідчить, що рослини ячменю ярого сорту Саломі стримують розвиток щільності популяції мікроміцетів порівняно із рослинами сорту Себастьян, які істотно стимулюють розвиток фітопатогенних мікроміцетів і можуть спричиняти біологічне забруднення агроценозів злакових культур.

Отже, за органічної технології вирощування спостерігали зростання щільності популяції мікроміцетів у листовому мікrobiомі обох досліджуваних сортів ячменю ярого від фази кущення до фази колосіння, що свідчить про відсутність пестицидного тиску на агроценоз злакових. Рослини ячменю ярого сорту Саломі істотно стримували розвиток популяції мікроміцетів на вегетативних органах росли порівняно із рослинами сорту Себастьян.

Досліджували видовий склад фітопатогенів у листковому мікrobiомі рослин ячменю ярого за різних технологій вирощування. Впродовж років дослідження за інтенсив-

ної технології вирощування рослин у листковому мікrobiомі рослин ячменю ярого сорту Себастьян паразитувало 14 видів мікроміцетів: *F. graminearum*, *F. oxysporum*, *F. moniliforme*, *F. gibbosum*, *F. avenaceum*, *D. sorociniana*, *D. teres*, *A. alternate*, *A. niger*, *R. secalis*, *P. herpotrichoides*, *S. nodorum*, *A. flavus*, *P. notatum*, які характеризувалися різною частотою трапляння від 11 до 86%. Водночас, у листковому мікrobiомі рослин ячменю ярого сорту Саломі ідентифіковано 13 видів мікроміцетів, таких як: *F. graminearum*, *F. oxysporum*, *F. gibbosum*, *F. avenaceum*, *D. sorociniana*, *D. teres*, *A. alternate*, *R. secalis*, *P. herpotrichoides*, *S. nodorum*, *A. flavus*, *A. niger*, *P. notatum*. (рис. 3).

Визначено, що у листковому мікrobiомі рослин ячменю ярого сорту Себастьян домінували 6 видів фітопатогенів: *D. sorociniana*, *F. avenaceum*, *F. oxysporum*, *F. gramineum*, *D. teres*, *A. alternate*, частота трапляння яких була від 65 до 86%. До поширених видів відносилися мікроміцети видів *A. niger*, *R. secalis*, *P. herpotrichoides*, *S. nodorum*, *F. moniliforme*, *F. gibbosum*, із частотою трапляння 28–48%. Також у листковому мікrobiомі рослин ячменю ярого сорту Себастьян зустрічалося два рідкісних види *A. flavus* та *P. notatum* із частотою трапляння до 20%. Водночас у листковому мікrobiомі рослин ячменю ярого сорту Саломі домінувало 8 видів мікроміцетів *T. harzianum*, *F. avenaceum*, *D. sorociniana*, *D. teres*, *A. alternate*, *F. moniliforme*, *F. gibbosum*, *F. oxysporum*, із частотою трапляння від 53 до 80%. Окрім того, ідентифіковано 5 рідкісних видів мікроміцетів (*P. notatum*, *S. nodorum*, *A. flavus*, *R. secalis*, *R. secalis*), їхня частота трапляння не перевищувала 20%.

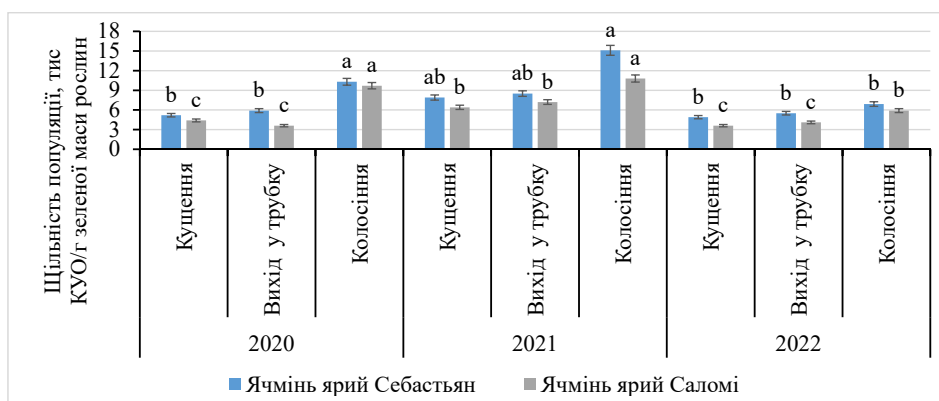


Рис. 2. Щільність популяції фітопатогенів у листковому мікrobiомі різних сортів ячменю ярого за органічної технології вирощування ($\bar{x} \pm SD$, Тьюкі тест, $n = 5$ повторів); а, b, c – статистично значущі відмінності кількості мікроорганізмів ($P < 0.05$)

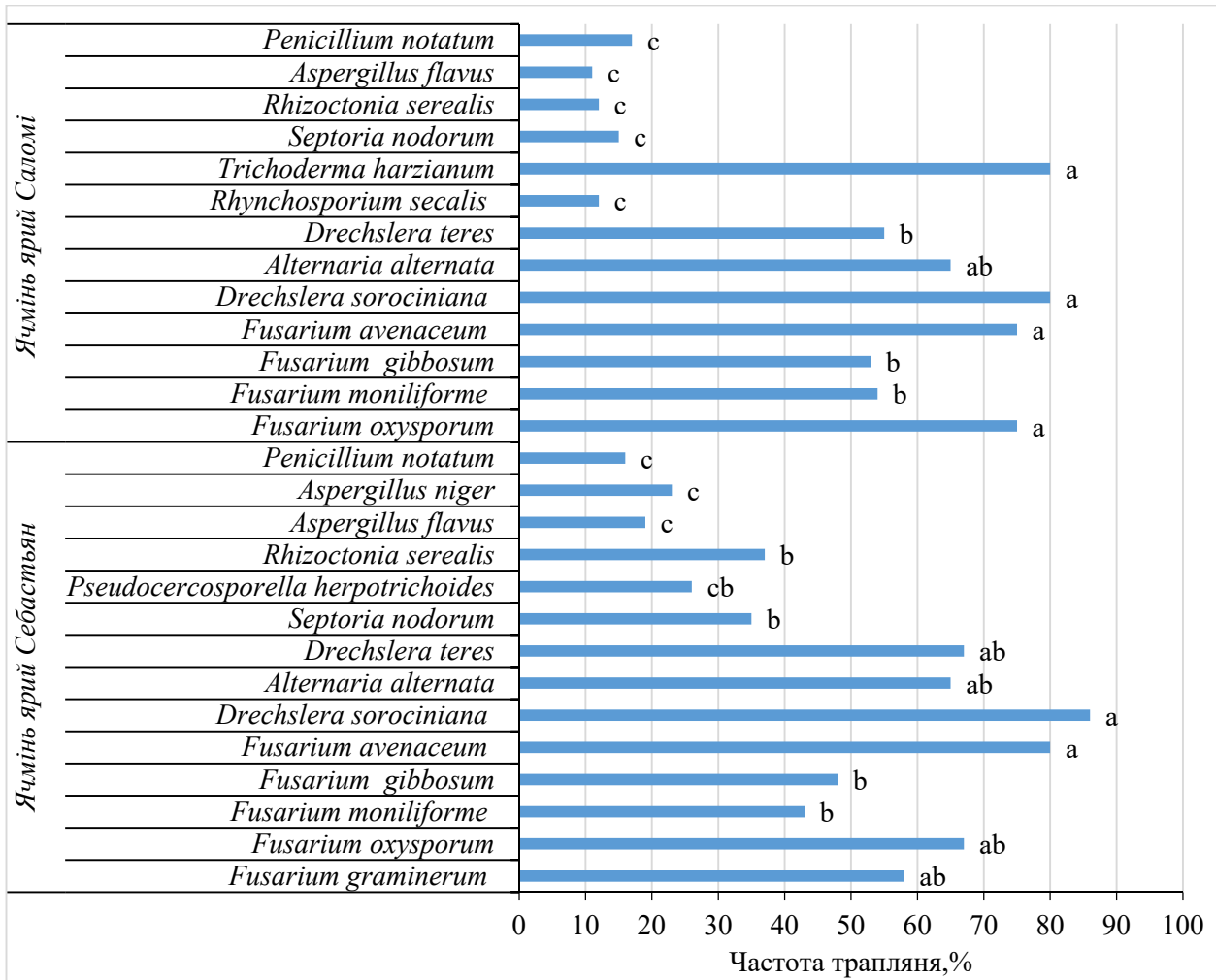


Рис. 3. Видовий склад популяцій фітопатогенів у листовому мікробіомі різних сортів ячменю ярого за інтенсивної технології вирощування ($x \pm SD$, Тьюкі тест, $n = 5$ повторів); а, b, с – статистично значущі відмінності кількості мікроорганізмів ($P < 0.05$)

В умовах органічної технології вирощування у листовому мікробіомі рослин ячменю ярого досліджуваних сортів видовий склад мікроміцетів був найрізноманітнішим порівняно із інтенсивною технологією вирощування рослин, але частота трапляння видів була нижчою і коливалася від 11 до 70% (рис. 4).

У листовому мікробіомі рослин ячменю ярого сорту Себастьян паразитувало 19 видів мікроміцетів, серед них: домінуючі види – *T. harzianu*, *D. sorociniana*, *D. teres*, *D. graminea*, *A. alternate*, *F. oxysporum*, *F. avenaceum*, *F. gramineum*, із частотою трапляння 58–70%; поширені види – *R. secalis*, *R. secalis*, *R. secalis*, *P. herpotrichoides*, *S. nodorum*, *F. moniliforme*, *F. gibbosum*, *A. niger*, *F. sporotrichella*, *F. solani*, із частотою трапляння 23–48%

та рідкісні – *A. flavus*, *P. notatum* (16–19%) (див. рис. 4). Водночас у листовому мікробіомі рослин ячменю ярого сорту Саломі паразитувало 16 видів мікроміцетів: *T. harzianum*, *D. sorociniana*, *D. teres*, *D. graminea*, *A. alternate*, *F. oxysporum*, *F. avenaceum*, *F. moniliforme*, *F. gibbosum*, *F. gramineum*, *R. secalis*, *A. flavus*, *P. notatum*, *P. herpotrichoides*, *S. nodorum*, *R. secalis* із частотою трапляння від 11 до 65%. До домінуючих мікроміцетів належали види: *T. harzianum*, *D. sorociniana*, *D. teres*, *D. graminea*, *A. alternate*, *F. oxysporum*, *F. avenaceum*, *F. moniliforme*, *F. gibbosum*, із частотою трапляння до 65%. До поширених видів належав мікроміцет *F. gramineum* із частотою трапляння 35%. Також ідентифіковано 6 рідкісних видів мікроміцетів: *R. secalis*, *A. flavus*,

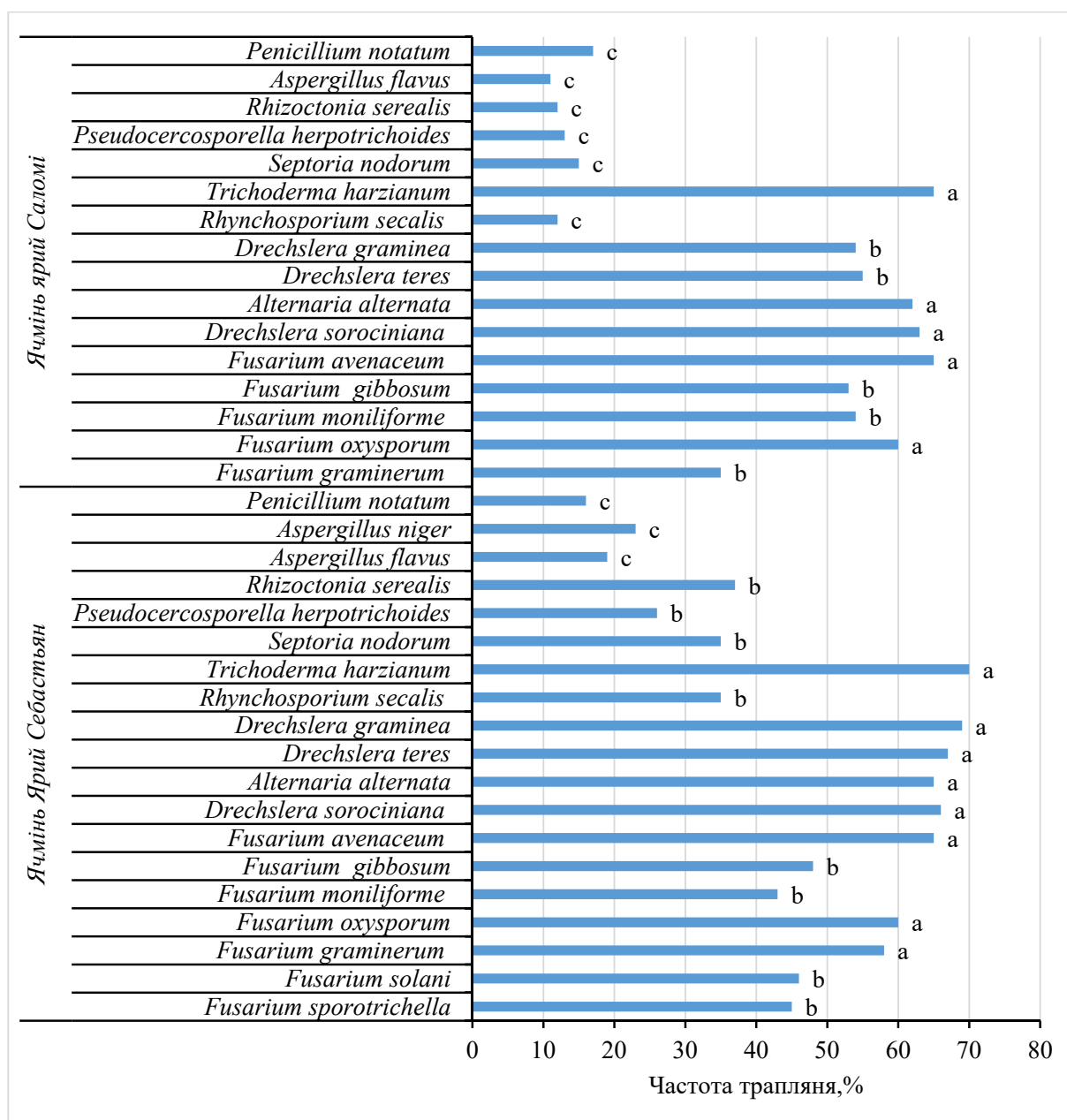


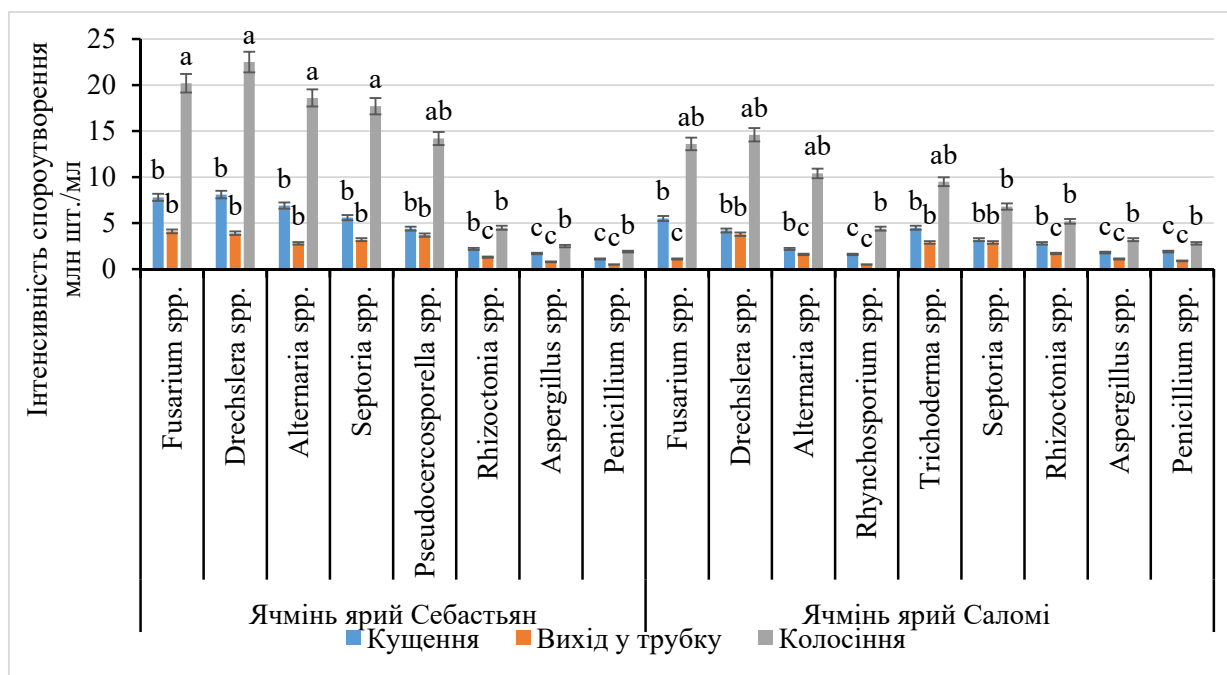
Рис. 4. Видовий склад популяцій фітопатогенів у листковому мікробіомі різних сортів ячменю ярого за органічної технології вирощування ($x \pm SD$, Тьюкі тест, $n = 5$ повторів); а, b, c – статистично значущі відмінності кількості мікроорганізмів ($P < 0.05$)

P. notatum, *P. herpotrichoides*, *S. nodorum*, *R. secalis*, де їхня частота трапляння була у межах від 11 до 17% (див. рис. 4).

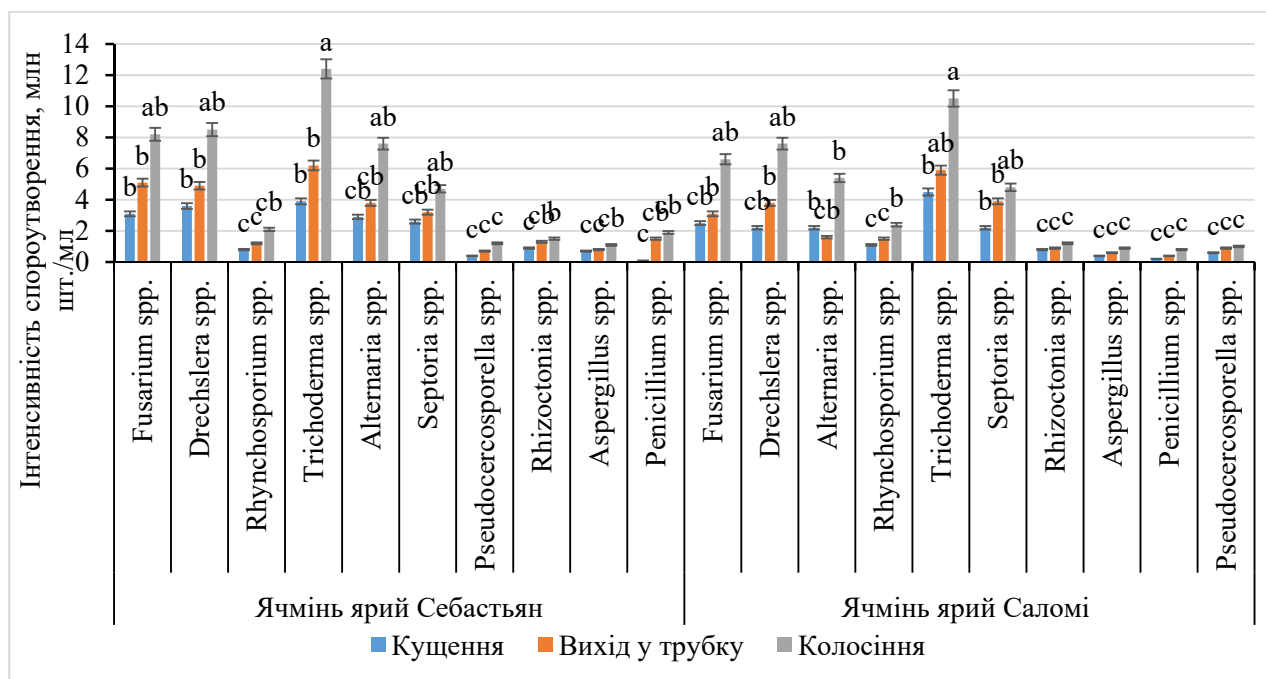
За інтенсивної технології вирощування рослин у листковому мікробіомі досліджуваних сортів ячменю ярого біорізноманіття видів мікроміцетів була меншою ніж в умовах органічної технології вирощування, але частота трапляння видів мікроміцетів істотно вищою, що свідчить про більшу конкуренцію видів між собою.

Рослини ячменю ярого сорту Саломі своїми біологічно активними речовинами істотно стримували розвиток популяцій мікроміцетів в листковому мікробіомі порівняно із рослинами сорту Себастьян за обох технологій вирощування.

Лабораторні дослідження показали, що у листковому мікробіомі рослин ячменю ярого в умовах різних технологій вирощування інтенсивність спорування домінуючих мікроміцетів коливалася від 0,2 до 22,5 млн шт./мл (рис. 5-а,б).



a



b

Рис. 5. Інтенсивність спорування мікробіоти у листковому мікробіомі рослин ячменю ярого за впливу різних технологій вирощування (а – традиційна; б – органічна) ($\bar{x} \pm SD$, Тьюкі тест, $n = 5$ повторів); а, б, с – статистично значущі відмінності кількості мікроорганізмів ($P < 0.05$)

За інтенсивної технології вирощування у листковому мікробіомі рослин ячменю ярого сорту Себастьян високою інтенсивністю спорування характеризувалися мікробіоти родів *Fusarium spp.*, *Drechslera spp.*, *Alternaria spp.* та *Septoria spp.*, їх

показник коливався від 17,7 до 22,5 млн шт./мл. Водночас у листковому мікобіомі рослин ячменю ярого сорту Саломі високою інтенсивністю споруутворення характеризувалися мікроміцети роду *Fusarium* spp., *Drechslera* spp., яка була в межах від 13,6 до 14,6 млн шт./мл (див. рис. 5-а). Це свідчить, що сорти рослин ячменю ярого завдяки сортовим особливостям здатні по різному впливати на репродуктивну здатність фітопатогенів.

За органічної технології вирощування у листковому мікобіомі рослин ячменю ярого сорту Себастьян інтенсивність споруутворення мікроміцетів родів *Fusarium* spp., *Drechslera* spp., *Alternaria* spp. та *Septoria* spp., була у 2–3 рази нижчою порівняно із інтенсивною технологією вирощування і становила 4,7–8,5 млн шт./мл. У листковому мікобіомі рослин ячменю ярого сорту Саломі інтенсивність споруутворення зазначених родів мікроміцетів коливалася від 2,4 до 6,6 млн шт./мл. Слід зазначити, що у листковому мікобіомі рослин ячменю ярого досліджуваних сортів високою інтенсивністю споруутворення характеризувався мікроміцет роду *Trichoderma* spp. (10,5–12,4 млн шт./мл) (див. рис. 5-б). Рослини ячменю ярого сорту Себастьян істотно впливали на збільшення частоти трапляння видів мікроміцетів, щільності їх популяції та інтенсивності споруутворення порівняно із рослинами ячменю ярого сорту Саломі, який характеризувався нижчими результатами за оцінки цих показників. Незалежно від вегетаційного періоду та внесенням тих чи інших препаратів тенденція зберігалася щодо сортових особливостей рослин. Фізіолого-біологічні особливості сорту Себастьян, стимулювали розвиток популяцій мікроміцетів у листковому мікобіомі рослин ячменю ярого, а рослини ячменю ярого сорту Саломі стримували.

Висновки

У листковому мікобіомі рослин ячменю ярого сортів Себастьян і Саломі визначено різноманітний видовий склад фітопатогенів із різною інтенсивністю споруутворення, яка залежить від абіотичних (кліматичні умови), біотичних (сортіві особливості рослин) та антропогенних (технології вирощування) чинників.

За органічної технології вирощування рослин ячменю ярого видовий склад фітопатогенів був різноманітніший (16–19 видів) у порівнянні із інтенсивною технологією вирощування рослин (13–14 видів). Водночас інтенсивність споруутворення, щільність популяції та частота трапляння видів мікроміцетів за інтенсивної технології вирощування знижувалась (майже у 1,5 рази) у фазі виходу у трубку, а після внесення хімічних препаратів істотно зростала у фазі колосіння. Це свідчить про пестицидний тиск на популяції фітопатогенів в агроценозах рослин ячменю ярого.

За органічної технології вирощування спостерігали збалансований добір між популяціями мікроміцетів, що зростав впродовж старіння культури і характеризувався низькою інтенсивністю споруутворення фітопатогенів. Рослини ячменю ярого сорту Себастьян, своїми фізіолого-біохімічними речовинами, істотно впливали на збільшення частоти трапляння видів мікроміцетів, щільності їхньої популяції та інтенсивності споруутворення порівняно із рослинами ячменю ярого сорту Саломі, який характеризувався нижчими результатами при оцінці цих показників.

Отже, оцінювання формування популяцій фітопатогенів у листковому мікобіомі злакових культур дозволить характеризувати сорт, як чинник регуляції чисельності фітопатогенів в агрофітоценозах.

Список використаної літератури

- Безноско І., Горган Т., Мосійчук І., Буняк О., Терновий Ю. Вплив різних технологій вирощування на чисельність основних еколого-трофічних груп. *Вісник Львівського університету*. 2022. № 86. С. 58–72. <https://doi.org/10.30970/vlubs.2022.86.05>.
- Безноско І., Горган Т., Туровник Ю., Мостов'як І., Мудрак В. Патогенна мікобіота насіння зернових культур під впливом різних технологій вирощування. *Агроєкологічний журнал*. 2022. № 1. С. 110–120. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2022.255185>.
- Безноско І., Парфенюк А., Горган Т., Гаврилюк Л., Туровник Ю. Екологічна роль сортів озимої пшениці у фітосанітарній оптимізації агроєкосистем. *Агробіологія*. 2021. С. 180–187. <https://doi.org/10.33245/2310-9270-2021-163-1-180-187>.
- Безноско І., Парфенюк А., Терновий Ю. Формування фітопатогеного мікобіому на вегетативних органах рослин в агроценозах пшениці озимої. *Вісник Львівського університету*. Серія біологічна. 2023. 90. С. 3–16. <https://doi.org/10.30970/vlubs.2023.90.01>.

Вожегова Р., Коковіхін С. Зрошуване землеробство – гарант продовольчої безпеки України в умовах зміни клімату. *Вісник аграрної науки*. 2018. № 11. С. 28–34.

Дерменко О. Хвороби колосу пшениці: діагностика, шкідливість та заходи захисту. Нова пропозиція: *Український агробізнесовий журнал*. 2016. 7/8. С. 96–100. [Електронний ресурс] URL: <http://propozitsiya.com/bolezni-kolosa-pshenicy-diagnostika-opasnost-i-mery-zashchity/2016-96-100> (дата звернення 24.02.2024).

ДСТУ 7847:2015. Якість ґрунту. Визначення чисельності мікроорганізмів у ґрунті методом посіву на тверде (агаризоване) живильне середовище. [Чинний від 01.07.2016]. Державний стандарт України.

Мостов'як І., Дем'янюк О., Парфенюк А., Безноско І. Сорт як чинник формування стійких агроценозів зернових культур. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2020. № 2. С. 110–118. <https://doi.org/10.31210/visnyuk2020.02.13>.

Парфенюк А. Сортрослиняк фактор біологічної безпеки в агроценозах України. *Агроекологічний журнал*. 2017. № 2. С. 155–163. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2017.220172>.

Парфенюк А., Волощук Н. Формування фітопатогенного фону в агрофітоценозах. *Агроекологічний журнал*. 2016. № 4. С. 106. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2016.271247>.

Петренко В., Лучна І., Боровська І. Залежність фітосанітарного стану посівів озимої пшениці від погодних умов. *Вісн. центр наукового забезпечення АПВ Харківської області*. 2016. № 20. С. 60–68.

Терновий Ю., Гавлюк В., Парфенюк А. Мікробіота ризосфери рослин гороху за впливу різних технологій вирощування культури. *Агроекологічний журнал*. 2018. 4. С. 50–58. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2018.155827>.

Швартау В., Михальська Л., Зозуля О. Поширення фузаріозу в Україні. *Ахрономія*. 2017. № 4. С. 40–43.

Barratt B., Moran V., Bigler F., Van Lenteren J. The status of biological control and recommendations for improving uptake for the future. *BioControl*. 2018. 63. P. 155–167. <https://doi.org/10.1007/s10526-017-9831-y>

Gostiňar C. Towards genomic criteria for delineating fungal species. *Journal of Fungi*. 2020. № 6(4). 246 p. <https://doi.org/10.3390/jof6040246>.

Köhl J., Kolnaar R., Ravensberg W. Mode of action of microbial biological control agents against plant diseases: Relevance Beyond Efficacy. *Front. Plant Sci*. 2019. 10. 845 p.

Lamichhane J. Pesticide use and risk reduction in European farming systems with IPM: An introduction to the special issue. *Crop. Prot.* 2017. № 97. P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.01.017>.

Marin-Felix Y., Groenewald J., Cai L., Chen Q., Marincowitz S., Barnes I. Genera of phytopathogenic fungi: GOPHY 1. *Studies in mycology*. 2017. № 86 (1). P. 99–216. <https://doi.org/10.1016/j.simyco.2017.04.002>.

Ngoune L., Shelton C. Factors affecting yield of crops. In *agronomy–climate change and food security; intech open*: London, UK. 2020. № 32. P. 137–144. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90672>.

O'Brien P. Biological control of plant diseases. *Australasian Plant Pathology*. 2017. № 46. P. 293–304. <https://doi.org/10.1007/s13313-017-0481-4>.

Reinhold-Hurek B., Bunger W., Burbano C., Sabale M., Hurek T. Roots shaping their microbiome: global hotspots for microbial activity. *Annu. Rev. Phytopathol.* 2015. 53. P. 403–424. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102342>.

Ruytinx J., Miyauchi S., Hartmann-Wittulsky S., Pereira M., Guinet F., Churin J., Put C., Tacon F., Veneault-Fourrey C., Martin F., Kohler A. A transcriptomic atlas of the ectomycorrhizal fungus *Laccaria bicolor*. *Microorganisms*. 2021. № 9 (12). 2612 p. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102342>.

Sessitsch A., Weilharter A., Gerzabek M., Kirchmann H., Kandeler E. Microbial population structures in soil particle size fractions of a long-term fertilizer field experiment. *Applied environmental microbiology*. 2021. № 67 (9). P. 4215–24. <https://doi.org/10.1128/AEM.67.9.4215-4224.2001>.

Van Montagu M. The future of plant biotechnology in a globalized and environmentally endangered world. *Genetics and Molecular Biology*. 2020. № 43. <https://doi.org/10.1590/1678-4685-GMB-2019-0040>.

References (translated & transliterated)

- Beznosko, I., Gorgan, T., Mosiychuk, I., Bunyak, O., & Ternovy, Yu. (2022). Vplyv riznykh tekhnolohiy vyroshchuvannya na chyselnist osnovnykh ekoloho-trofichnykh hrup [The influence of different cultivation technologies on the abundance of the main ecological and trophic groups]. *Visnyk Lvivskoho universytetu [Bulletin of Lviv University]*, 86, 58–72. <http://dx.doi.org/10.30970/vlubs.2022.86.05> [in Ukrainian].
- Beznosko, I., Gorgan, T., Turovnik, Yu., Mostovyak, I., & Mudrak, V. (2022). Patohenna mikrobiota nasinnya zernovykh kultur pid vplyvom riznykh tekhnolohiy vyroshchuvannya [Pathogenic mycobiota of cereal seeds under the influence of different cultivation technologies]. *Ahroekolohichnyy zhurnal [Agroecological journal]*, 1, 110–120. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2022.255185> [in Ukrainian].
- Beznosko, I., Parfenyuk, A., Gorgan, T., Gavriyuk, L., & Turovnik, Y. (2021). Ekolohichna rol sortiv ozymoyi pshenytsi u fitosanitarniy optymizatsiyi ahroekosystem [Ecological role of winter wheat varieties is in phytosanitary optimization of agroecosystems]. *Ahrobiolohiya [Agrobiology]*, 180–187. <https://doi.org/10.33245/2310-9270-2021-163-1-180-187> [in Ukrainian].
- Beznosko I., Parfenyuk A., & Ternovy YU. (2023). Formuvannya fitopatohennoho mikrobiomu na vehetatyvnykh orhanakh roslyn v ahrotsenozakh pshenytsi ozymoyi. *Visnyk L'vivskoho universytetu. Seriya biolohichna. [Formation of phytopathogenic mycobiome on vegetative organs of plants in agroecosystems of winter wheat]. Visnyk Lvivskoho universytetu. Seriya biolohichna. [Bulletin of Lviv University. Biological series]*, 2/90, 3–16. <http://dx.doi.org/10.30970/vlubs.2023.90.01> [in Ukrainian].
- Vozhehova, R., & Kokovikhin, S. (2018). Zroshuvane zemlerobstvo ye harantom prodovolchoyi bezpeky Ukrayiny v umovakh zminy klimatu [Irrigated agriculture is a guarantor of Ukraines food security in the face of climate change]. *Visnyk ahrarnoyi nauky [Herald of Agrarian Science]*, 11, 28–34 [in Ukrainian].
- Dermenko, O. (2016). Khvoroby kolosu pshenytsi: diahnozyka, shkidlyvist ta zakhody zakhystu [Wheat ear diseases: diagnosis, harmfulness and protection measures]. *Nova propozyziya: Ukrayinskyy zhurnal pro ahrobiznes [New offer: Ukrainian magazine on agribusiness]*, 7/8, 96–100. [Electronic resource] URL: <http://propozitsiya.com/bolezni-kolosa-pshenicy-diaagnostika-opasnost-i-mery-zashchity/2016-96-100> (access date 24.02.2024) [in Ukrainian].
- DSTU 7847:2015. (2016). Yakist hruntu. Vyznachennya chyselnosti mikroorhanizmiv u grunti metodom posivu na tverde (aharyzovane) zhyvylne seredovyshche [Soil quality. Determination of the number of microorganisms in the soil by the method of sowing on a solid (agarized) nutrient medium]. Diye z 01.07.2016 – Effective from 07.01.2016. *Derzhavnyy standart Ukrayiny [State standard of Ukraine]* [in Ukrainian].
- Mostovyak, I., Demyaniuk, O., Parfeniuk, A., & Beznosko, I. (2020). Sort yak faktor formuvannya stiykykh ahrotsenoziv zernovykh kultur [Variety as a factor in the formation of stable agroecosystems of grain crops]. *Visnyk Poltavskoyi derzhavnoyi ahrarnoyi akademiyi [Bulletin of the Poltava State Agrarian Academy]*, 2, 110–118. <https://doi.org/10.31210/visnyk2020.02.13> [in Ukrainian].
- Parfeniuk, A. (2017). Sort roslyn yak faktor biolohichnoyi bezpeky v ahrotsenozakh Ukrayiny [Plant variety as a factor of biological safety in agroecosystems of Ukraine]. *Ahroekolohichnyy zhurnal [Agroecological journal]*, 2, 155–163. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2017.220172> [in Ukrainian].
- Parfenyuk, A., & Voloshchuk, N. (2016). Formuvannya fitopatohennoho fonu v ahrofitotsenozakh [Formation of the phytopathogenic background in agrophytocenoses]. *Ahroekolohichnyy zhurnal [Agroecological journal]*, 4, 106. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2016.271247> [in Ukrainian].
- Petrenkova, V., Luchna, I., & Borovska, I. (2016). Zalezhnist fitosanitarnoho stanu posiviv ozymoyi pshenytsi vid pohodnykh umov [Dependence of phytosanitary status of winter wheat crops on weather conditions]. *Visn. tsentr naukovooho zabezpechennya APV Kharkivskoyi obl [Visn. center of sciences provision of APV of the Kharkiv region]*, 20, 60–68 [in Ukrainian].
- Ternovy, Yu., Havlyuk, V., & Parfenyuk, A. (2018). Mikrobiota ryzosfery roslyn horokhu za vplyv riznykh tekhnolohiy vyroshchuvannya kultury [The microbiota of the rhizosphere of pea plants under the influence of different cultivation technologies]. *Ahroekolohichnyy zhurnal [Agroecological journal]*, 4, 50–58. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2018.155827> [in Ukrainian].
- Shvartau, V., Mykhalska, L., & Zozulya, O. (2017). Poshyrennya fuzariozu v Ukrayini [Spread of fusarium in Ukraine]. *Akhronomiya [Achronomy]*, 4, 40–43 [in Ukrainian].

- Barratt, B., Moran, V., Bigler, F., & Van Lenteren, J. (2018). The status of biological control and recommendations for improving uptake for the future. *BioControl*, 63, 155–167. <http://dx.doi.org/10.1007/s10526-017-9831-y> [in English].
- Gostinčar, C. (2020). Towards genomic criteria for delineating fungal species. *Journal of Fungi*, 6 (4), 246. <https://doi.org/10.3390/jof6040246> [in English].
- Köhl, J., Kolnaar, R., & Ravensberg, W. (2019). Mode of Action of Microbial Biological Control Agents against Plant Diseases: Relevance Beyond Efficacy. *Front. Plant Sci.*, 10, 845 [in English].
- Lamichhane, J. (2017). Pesticide use and risk reduction in European farming systems with IPM: An introduction to the special issue. *Crop. Prot.*, 97, 1–6. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cropro.2017.01.017> [in English].
- Marin-Felix, Y., Groenewald, J., Cai, L., Chen, Q., Marincowitz, S., & Barnes, I. (2017). Genera of phytopathogenic fungi: GOPHY 1. *Studies in mycology*, 86(1), 99–216. <http://dx.doi.org/10.1016/j.simyco.2017.04.002> [in English].
- Ngoune, L., & Shelton, C. (2020). Factors affecting yield of crops. In *agronomy-climate change and food security; intech open*: London, UK, 32, 137–144. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.90672> [in English].
- O'Brien, P. (2017). Biological control of plant diseases. *Australasian Plant Pathology*, 46, 293–304. <https://doi.org/10.1007/s13313-017-0481-4> [in English].
- Reinhold-Hurek, B., Bunger, W., Burbano, C., Sabale, M., & Hurek, T. (2015). Roots shaping their microbiome: global hotspots for microbial activity. *Annu. Rev. Phytopathol.*, 53, 403–424. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102342> [in English].
- Ruytinx, J., Miyauchi, S., Hartmann-Wittulsky, S., Pereira, M., Guinet, F., Churin, J., Put, C., Tacon, F., Veneault-Fourrey, C., Martin, F., & Kohler, A. (2021). A transcriptomic atlas of the ectomycorrhizal fungus *Laccaria bicolor*. *Microorganisms*, 9 (12), 2612. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9122612> [in English].
- Sessitsch, A., Weilharter, A., Gerzabek, M., Kirchmann, H., & Kandeler, E (2021). Microbial population structures in soil particle size fractions of a long-term fertilizer field experiment. *Applied environmental microbiology*, 67(9), 4215–24. <http://dx.doi.org/10.1128/AEM.67.9.4215-4224.2001> [in English].
- Van Montagu, M. (2020). The future of plant biotechnology in a globalized and environmentally endangered world. *Genetics and Molecular Biology*, 43. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4685-GMB-2019-0040> [in English].

Отримано: 21.03.2024

Прийнято: 05.04.2024



УДК 633.12:631.5:631.8

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.20>

ВПЛИВ РЕГУЛЯТОРА РОСТУ БІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ LEANUM НА ПРОДУКТИВНІСТЬ СОРТІВ ГРЕЧКИ РІЗНОГО МОРФОТИПУ

Р. О. Кузьменко¹, Л. А. Яковець², О. М. Тихонова³, Р. М. Бордун⁴, Л. В. Крючко⁵

Застосування біопрепаратів у технологіях вирощування культурних рослин сприяє підвищенню врожайності та якості продукції, збагаченню ґрунту корисною біотою, дає можливість зменшити дози мінеральних добрив і засобів захисту рослин. Основу мікробіологічних препаратів становлять живі мікроорганізми, які відзначаються комплексом агрономічно-корисних властивостей – це азотфіксація, фосфатмобілізація, рістстимуляція, антагонізм до фітопатогенів. Метою дослідження було дослідити реакцію сортів гречки різного морфотипу на способи застосування регулятора росту біологічного походження Leanit. Проаналізувати дані вітчизняних та зарубіжних літературних джерел, що стосуються вивчення досвіду з оптимізації елементів технології вирощування гречки шляхом комплексного застосування біопрепаратів, мікродобрив та регуляторів росту. Досліди проводили в умовах північно-східного Лісостепу України

¹ аспірант кафедри агротехнологій та ґрунтознавства
(Сумський національний аграрний університет, м. Суми)
e-mail: andb201727@ukr.net
ORCID: 0009-0005-3987-7736

² кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри ботаніки, генетики та захисту рослин
(Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця)
e-mail: ludmila28334@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5283-7169

³ кандидат біологічних наук,
доцент кафедри екології та ботаніки
(Сумський національний аграрний університет, м. Суми)
e-mail: ur5apn@ukr.net
ORCID: 0000-0003-0961-4896

⁴ кандидат сільськогосподарських наук,
завідувач відділу інноваційного провайдингу
та сільськогосподарського дорадництва
(Інститут сільського господарства Північного Сходу НААН, с. Сад, Сумська обл.)
e-mail: r.bordun@ukr.net
ORCID: 0000-0002-6936-9119

⁵ кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри біотехнології та хімії
(Сумський національний аграрний університет, м. Суми)
e-mail: ludmila-kruchko@meta.ua
ORCID: 0000-0003-0528-210X

в Інституті сільського господарства Північного Сходу НААН (2023 р.). Об'єктом дослідження були сорти гречки різного морфотипу (селекції Інституту сільського господарства Північного Сходу).

Методи досліджень – польові досліді, що включали фенологічні, біометричні спостереження та структурний аналіз рослин. У результаті досліджень вивчено особливості росту та розвитку, продуктивність рослин та врожайність сортів гречки різного морфотипу в залежності від способу застосування біопрепарату *Leanum*. Оцінка результатів визначення врожайності свідчить, що по сортах детермінантного типу Ярославна та Селяночка варіанти з використанням біопрепарату способом обробки насіння та обробки насіння перед посівом + обприскування в період вегетації мали суттєвий вплив на урожайність рослин. Обприскування рослин в період вегетації також мало позитивний результат, але істотно менший. У індетермінантних сортах спостерігалась подібна тенденція до зростання врожайності. Так, на контрольному варіанті сортів гречки Слобожанка та Сімка вона була значно меншою у порівнянні з обробкою насіння, обприскуванням у період вегетації та їх технологічному поєднанні. За результатами досліджень найбільш доцільним є вирощування детермінантних сортів гречки Ярославна та Селяночка з використанням біопрепарату *Leanum*. Найкращий результат був отриманий при вирощуванні сорту гречки Селяночка на варіанті обробка насіння перед посівом + обприскування рослин у період вегетації (врожайність 2,42 т/га).

Ключові слова: обробка насіння, урожайність, біопрепарат, період вегетації, генетичний потенціал.

THE EFFECT OF A GROWTH REGULATOR OF BIOLOGICAL ORIGIN LEANUM ON THE PRODUCTIVITY OF BUCKWHEAT VARIETIES OF DIFFERENT MORPHOTYPES

R. O. Kuz'menko, L. A. Yakovets, O. M. Tykhonova, R. M. Bordun, L. V. Kriuchko

The use of biological preparations in the technologies of cultivation of cultivated plants contributes to increasing the yield and quality of products, enriching the soil with useful biota, and makes it possible to reduce the doses of mineral fertilizers and plant protection agents. The basis of microbiological preparations is living microorganisms, which are characterized by a complex of agronomically useful properties – nitrogen fixation, phosphate mobilization, growth stimulation, antagonism to phytopathogens.

*The purpose of the research work was to investigate the reaction of buckwheat varieties of different morphotypes to methods of applying the growth regulator of biological origin *Leanum*. To analyze the data of domestic and foreign literary sources related to the study of experience in optimizing the elements of buckwheat cultivation technology through the complex use of biological preparations, microfertilizers and growth regulators. The experiments were carried out in the conditions of the northeastern forest-steppe of Ukraine at the Institute of Agriculture of the Northeast of the National Academy of Sciences (2023). The object of the research was buckwheat varieties of different morphotypes (breeding of the Institute of Agriculture of the Northeast). Research methods are field experiments, which included phenological, biometric observations and structural analysis of plants.*

*As a result of the research, the peculiarities of growth and development, plant productivity and yield of buckwheat varieties of different morphotypes were studied, depending on the method of application of the biological preparation *Leanum*. The evaluation of the results of determining the yield shows that for varieties of the determinant type *Yaroslavna* and *Selyanochka*, options using a biopreparation by the method of seed treatment and seed treatment before sowing + spraying during the growing season had a significant effect on plant productivity. Spraying plants during the growing season also had a positive result, but significantly less. Indeterminate varieties showed a similar tendency to increase yield. Thus, on the control version of buckwheat varieties *Slobozhanka* and *Simka*, it was significantly smaller compared to seed treatment, spraying during the growing season and their technological combination. According to the research results, it is most appropriate to grow the determinant varieties of buckwheat *Yaroslavna* and *Selyanochka* with the use of biological preparation *Leanum*. The best result was obtained when growing the *Selyanochka* buckwheat variety on the option of seed treatment before sowing + spraying of plants during the growing season (yield 2.42 t/ha).*

Key words: seed treatment, productivity, biological preparation, vegetation period, genetic potential.

Вступ

Одним із пріоритетних завдань товаровиробників України є підвищення обсягів

виробництва зерна та поліпшення його якості. Відомо, що підвищення продуктивності рослин можна досягти не лише методами

селекції, а й за рахунок внесення необхідних доз добрив та біологічних препаратів у комплексі послідовних технологічних операцій вирощування культур (Кабанець та ін., 2017; Радченко та ін., 2018).

Застосування регуляторів росту рослин у технології вирощування сільськогосподарських культур є важливим фактором керування ростом і розвитком рослин у посівах. Регулятори росту дають можливість краще реалізувати потенційні можливості рослин, закладені природою та селекцією, регулювати строки дозрівання, поліпшувати якість продукції та підвищувати врожаї сільськогосподарських культур (Токмакова, 2008).

Зростання мікробіологічної активності ґрунту прискорює кругообіг поживних елементів у системі ґрунт – рослина – ґрунт, оптимізує живлення рослин, підвищує швидкість розкладання поживних решток та доступність поживних речовин для культурних рослин, збільшує інтенсивність газообміну між рослинами, ґрунтом і поверхнею поля (Long Jiang-xue et al., 2018; Радченко та ін., 2018).

Інтенсивне розмноження мікробіоти зумовлює прискорення росту і збільшення розмірів кореневої системи культурних рослин. Це допомагає рослинам виживати навіть у несприятливих умовах півдня України, що, безумовно, впливає на врожайність, а отже і прибутки агровиробництва (Токмакова, 2008; Тригуб та ін., 2022).

Наукові дослідження та виробничі випробування свідчать, що нові органічні добрива забезпечують суттєве зростання мікробіологічної активності ґрунту навіть у найбільш екстремальних умовах. Їх використання позитивно впливає на доступність ґрунтових запасів елементів живлення, сприяє формуванню сталих та високих урожаїв сільськогосподарських культур (Вінюков та ін., 2014; Яковець і Соломон, 2023).

Численні дослідження свідчать, що використання біопрепаратів у технологіях вирощування культурних рослин сприяє підвищенню врожайності та якості продукції, збагаченню ґрунту корисною біотою, дає можливість зменшити дози мінеральних добрив і засобів захисту рослин. Основу мікробіологічних препаратів становлять живі мікроорганізми, які відзначаються комплексом агрономічно-корисних властивостей – це азотфіксація, фосфатмобілізація, рістстимуляція, антагонізм до фітопатогенів (Кабанець та ін., 2017; Jaroszewska et al., 2019; Тригуб та ін., 2022).

Отримання сталих і високих врожаїв гречки нерозривно пов'язане з родючістю ґрунту, яка залежить від інтенсивності процесів життєдіяльності організмів у ґрунті (Радченко та ін., 2018).

На думку Волкогона та інших дослідників (2006), реалізація потенціалу сучасних сортів сільськогосподарських культур можлива тільки при забезпеченні оптимального живлення рослин. Мікроорганізми є відповідальними за перетворення низки складних сполук у прості, доступні для живлення рослин, тому виникає необхідність у застосуванні прийомів, спрямованих на збільшення чисельності та активності їх агрономічно цінних угруповань у кореневій зоні рослин. Одним із таких заходів є застосування у технологіях вирощування культурних рослин мікробних препаратів для передпосівної обробки насіння та обприскування рослин в період вегетації.

Дослідники Гораш та Хоміна (2009) вивчали рівень сортової реакції гречки на застосування біогенних факторів, яка проявлялася у формуванні рослинами більшої кількості, гілок, суцвіть, повноцінних зерен і маси 1000 зерен.

Водночас, іноземні дослідники стверджують, що традиційні резерви інтенсифікації технологій вирощування з метою збільшення валового виробництва сільськогосподарських культур майже вичерпані. Адже здебільшого передбачається зростання використання невідновлюваних ресурсів, забруднення довкілля та втрату біорізноманіття видів флори та мікроорганізмів (Jaroszewska et al., 2019; Bielski et al., 2022; Sinkovič et al., 2022).

Отже, актуальним питанням є вивчення особливостей застосування препаратів з штамами мікроорганізмів для інокуляції насіння в поєднанні з оптимізацією її системи живлення.

Метою науково-дослідної роботи було дослідити реакцію сортів гречки різного морфотипу на способи застосування регулятора росту біологічного походження. Проаналізувати дані вітчизняних та зарубіжних літературних джерел, що стосуються вивчення досвіду з оптимізації елементів технології вирощування гречки шляхом комплексного застосування біопрепаратів, мікродобрив та регуляторів росту.

Матеріал і методи

Досліди проводили в умовах північно-східного Лісостепу України в Інституті сільськогосподарства Північного Сходу НААН

(2023 р.). Ґрунти дослідних ділянок – чорнозем типовий малогумусний слабовилугуваний крупнопилувато-середньосуглинковий на лесі, орний шар якого характеризується наступними основними показниками: вміст гумусу – 4,1%, рН сольове – 6,3, сума ввібраних основ – 31 мг-екв., вміст рухомих форм фосфору – 11,3 мг/100 г ґрунту, обмінного калію – 9,2 мг/100 г ґрунту, вміст легкогідролізованого азоту за Корнфілдом – 11,2 мг/100 г.

Експеримент проводили за наступною схемою. Фактор А – сорти гречки різного морфотипу селекції Інституту сільського господарства Північного Сходу: детермінантні – Ярославна, Селяночка та індетермінантні – Слобожанка, Сімка. Фактор Б – способи обробки біопрепаратом *Leanum* (обробка насіння перед посівом, обприскування рослин у період вегетації та обробка насіння перед посівом + обприскування в період вегетації).

Дослідження проводили згідно існуючих методик дослідної справи (Ткачик, 2014). Повторність варіантів триразова. Площа посівної ділянки 30 м², облікової – 25 м². Загальна кількість ділянок: $N = LA \times LB \times LC = (2 \times 2) \times 4 \times 3 = 48$. Статистичні опрацювання результатів дослідів проводили дисперсійним методом, методами кореляції та регресії. При цьому використовували пакет прикладних програм Statistica 6,0 (Царенко та ін., 2000).

Результати та обговорення

За результатами структурного аналізу встановлено, що у рослин гречки детермінантних сортів найбільшою кількістю зерен із 1 рослини відзначився варіант: обробка насіння перед посівом біопрепаратом *Leanum* у нормі витрати 2,0 л/т + обприскування у період вегетації біопрепаратом у нормі витрати 2,0 л/га. Так, кількість зерен на одній рослині становила в середньому 58,1 шт. по сорту Ярославна і 63,9 шт. по сорту Селяночка. Сорти гречки Слобожанка та Сімка найбільшу кількість зерна формували також при обробці насіння перед посівом біопрепаратом *Leanum* у нормі витрати 2,0 л/т + обприскування у період вегетації біопрепаратом у нормі витрати 2,0 л/га, що становило відповідно 58,5 та 43,4 шт. на рослині. Високі показники зав'язуваності в усіх досліджуваних сортах гречки виявлено при одноразовій обробці насіння перед посівом біопрепаратом *Leanum* у нормі витрати 2,0 л/т.

Найвищий показник маси зерна з рослини (1,88 г) отримано по сорту гречки детермінантного типу Селяночка у варіанті із обробкою насіння перед посівом біопрепаратом *Leanum* у нормі витрати 2,0 л/т + обприскування у період вегетації біопрепаратом у нормі витрати 2,0 л/га. По сортах гречки індетермінантного морфотипу Слобожанка та Сімка найвищі і майже однакові показники врожаю з рослини отримано у двох варіантах: при одноразовому застосуванні біопрепарату *Leanum* способом передпосівної обробки насіння у нормі 2 л/т – 1,65 г і 1,11 г та при обробці насіння перед посівом біопрепаратом у нормі витрати 2,0 л/т + обприскування у період вегетації біопрепаратом у нормі витрати 2,0 л/га – 1,64 г та 1,11 г, відповідно.

Маса 1000 зерен була найменшою на контрольному варіанті і знаходилась в межах – 24,3–24,7 г. Найбільшою масою 1000 зерен відзначився варіант із обробкою насіння перед посівом біопрепаратом у нормі витрати 2,0 л/т + обприскування у період вегетації біопрепаратом у нормі витрати 2,0 л/га, що склало по сорту Ярославна 28,5 г та по сорту Селяночка 29,5 г. У індетермінантних сортах гречки Слобожанка та Сімка маса 1000 зерен була меншою – 24,6–28,3 г.

Таким чином простежується тенденція щодо позитивного впливу застосування біопрепарату *Leanum* на продуктивність та врожайність рослин гречки (табл. 1, 2).

Результати досліджень показали, що внесення біопрепарату *Leanum* позитивно вплинуло на продуктивність гречки і несуттєво вплинуло на тривалість фаз розвитку в період вегетації рослин гречки. Водночас, ці показники суттєво залежали від температурного режиму у період вегетації та від генетичного потенціалу сортів гречки різного морфотипу. Для удосконалення технології вирощування гречки в умовах північно-східного Лісостепу України запропоновано різні способи обробки гречки даним біопрепаратом, а також встановлена ефективність його застосування.

Оцінка результатів визначення врожайності свідчить, що по сортах детермінантного типу Ярославна та Селяночка варіанти з використанням біопрепарату: способом обробки насіння та обробки насіння перед посівом + обприскування в період вегетації мали суттєвий вплив на урожайність рослин (табл. 3). Так, по сорту гречки Ярославна у варіантах з обробкою насіння

Таблиця 1

Вплив біопрепарату Leanum на продуктивність рослин гречки сортів детермінантного типу

Спосіб обробки (фактор Б)	Сорти (фактор А)					
	Ярославна			Селяночка		
	кількість зерен із 1 росл, шт.	маса зерна із росл., г	маса 1000 зерен, г	кількість зерен із 1 росл., шт.	маса зерна із росл., г	маса 1000 зерен, г
Контроль	44,5	1,08	24,3	44,8	1,10	24,6
Обробка насіння перед посівом	55,7	1,59	28,5	60,7	1,71	28,2
Обприскування рослин у період вегетації	51,07	1,38	27,0	53,0	1,48	28,0
Обробка насіння перед посівом + обприскування рослин у період вегетації	58,1	1,65	28,5	63,9	1,88	29,5

Таблиця 2

Вплив біопрепарату Leanum на продуктивність рослин гречки сортів індетермінантного (звичайного) типу

Спосіб обробки (фактор Б)	Сорти (фактор А)					
	Слобожанка			Сімка		
	кількість зерен із 1 росл, шт.	маса зерна із росл., г	маса 1000 зерен, г	кількість зерен із 1 росл., шт.	маса зерна із росл., г	маса 1000 зерен, г
Контроль	44,7	1,11	24,7	41,2	1,01	24,6
Обробка насіння перед посівом	58,3	1,65	28,3	44,4	1,11	25,1
Обприскування рослин у період вегетації	51,9	1,38	26,5	42,0	1,05	24,9
Обробка насіння перед посівом + обприскування рослин у період вегетації	58,5	1,64	28,1	43,4	1,11	25,4

Таблиця 3

Вплив біопрепарату Leanum на урожайність сортів гречки різного морфотипу

Спосіб обробки (фактор Б)	Сорт (фактор А)			
	Ярославна	Селяночка	Слобожанка	Сімка
	Урожайність, т/га			
Контроль	1,29	1,49	1,34	1,15
Обробка насіння перед посівом	1,97	2,30	2,0	1,63
Обприскування рослин у період вегетації	1,58	1,99	1,61	1,20
Обробка насіння перед посівом + обприскування рослин у період вегетації	1,99	2,42	1,98	1,66

перед посівом вона складала – 1,97 т/га (приріст до контролю становив 0,68 т/га); при обробці насіння перед посівом + обприску-

вання рослин у період вегетації урожайність не істотно, але дещо збільшилась до 1,99 т/га, (приріст до контролю – 0,70 т/га).

Урожайність сорту гречки Селяночка також підвищувалась у варіантах з обробкою насіння біопрепаратом перед посівом і склала 2,30 т/га (приріст до контролю становив 0,81 т/га); при обробці насіння перед посівом + обприскування рослин у період вегетації урожайність становила 2,42 т/га (приріст до контролю – 0,93 т/га), що є найбільшим показником у досліді. Обприскування рослин у період вегетації також мало позитивний результат, але істотно менший.

У індетермінантних сортів спостерігалась подібна тенденція до зростання врожайності. Так, на контрольному варіанті сортів гречки Слобожанка та Сімка вона становила 1,34 т/га та 1,15 т/га відповідно, що значно менше у порівнянні з обробкою насіння, обприскуванням в період вегетації та їх технологічному поєднанні. Приріст у сорту гречки Слобожанка склав 0,27 т/га при обприскуванні рослин у період вегетації та 0,66 т/га при обробці насіння перед посівом. У сорту гречки Сімка майже не спостерігалось зростання врожайності при обприскуванні рослин в період вегетації, але вона була суттєво вищою на варіантах з обробкою насіння та обробкою насіння + обприскування рослин в період вегетації.

Висновки

Найвищий показник маси зерна з рослини (1,88 г) отримано по сорту гречки детермінантного типу Селяночка у варіанті із обробкою насіння перед посівом біопрепаратом Leapum при нормі витрати 2,0 л/т + обприскування у період вегетації біопрепаратом Leapum при нормі витрати 2,0 л/га. Найбільшою масою 1000 зерен відзначився варіант із обробкою насіння перед посівом біопрепаратом Leapum при нормі витрати 2,0 л/т + обприскування у період вегетації біопрепаратом Leapum при нормі витрати 2,0 л/га, що склало по сорту Ярославна 28,5 г та по сорту Селяночка 29,5 г.

Оцінка результатів визначення урожайності свідчить, що по сортах детермінантного типу Ярославна та Селяночка варіанти з використанням біопрепарату Leapum способом обробки насіння та обробки насіння перед посівом + обприскування у період вегетації мали суттєвий вплив на урожайність рослин. У індетермінантних сортів спостерігалась подібна тенденція до зростання врожайності.

За результатами досліджень найкращий результат був отриманий при вирощуванні детермінантного сорту гречки Селяночка на варіанті з обробкою насіння перед посівом + обприскування рослин у період вегетації (врожайність 2,42 т/га).

Список використаної літератури

- Вінюков О.О., Бондарева О.Б., Сіпун О.Л., Мамедова Е.І. Сучасні органічні технології – шлях екологізації сільськогосподарського виробництва. *Аграрний вісник Півдня*. 2014. № 1. С. 74–78.
- Волкогон В.В., Надкернична О.В., Ковалевська Т.М. Мікробні препарати у землеробстві. *Теорія і практика*. Київ. Аграрна наука, 2006. 312 с.
- Гораш О.С., Хоміна В.Я. Реакція сортів гречки на регулятори росту рослин. *Вісник аграрної науки*. 2009. № 5. С. 45–47.
- Кабанець В.М., Страхоліс І.М. Агротехнічні прийоми вирощування круп'яних культур для умов північно-східного Лісостепу України. *Інститут сільського господарства Північного Сходу НААН*. Сад, 2017. 20 с.
- Радченко М.В., Бутенко А.О., Глупак З.І. Вплив системи удобрення та ефективність регулятора росту на продуктивність гречки в умовах північно-східного лісостепу України. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2018. № 8 (2). С. 89–94. <https://doi.org/10.15421/2018.314>.
- Ткачик С.О. Методика проведення експертизи сортів рослин групи зернових, круп'яних та зернобобових на придатність до поширення в Україні. *ТОВ «Нілан-ЛТД»*. Київ, 2014. 82 с.
- Токмакова Л.М. Мікробіологічні засоби поліпшення фосфорного живлення рослин та підвищення продуктивності сільськогосподарських культур. *Посібник українського хлібороба*. 2008. С. 120–122.
- Тригуб О.В., Куценко О.М., Ляшенко В.В., Ногін В.В. Важливість вирощування гречки як унікальної й екологічно орієнтованої культури. *Scientific Progress & Innovations*. 2022. № 1. С. 69–76. <https://doi.org/10.31210/visnyk2022.01.08>.
- Царенко О.М., Злобін Ю.А., Скляр В.Г., Панченко С.М. Комп'ютерні методи в сільському господарстві та біології: Навчальний посібник. Суми: Університетська книга, 2000. 203 с.
- Яковець Л.А., Соломон А.М. Господарсько-біологічна оцінка сортів гречки на нектаропродуктивність залежно від факторів інтенсифікації землеробства. *Сільське господарство та лісівництво*. 2023. № 1 (28). С. 195–209. <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2023-1-14>.

Bielski S., Marks-Bielska R., Wiśniewski P. Investigation of energy and economic balance and GHG emissions in the production of different cultivars of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench): A case study in Northeastern Poland. *Energies*. 2022. Vol. 16. № 1. P. 17. <https://doi.org/10.3390/en16010017>.

Jaroszewska A., Sobolewska M., Podsiadło C., Stankowski S. The effect of fertilization and effective microorganisms on buckwheat and millet. *Acta Agroph.* 2019. Vol. 26. № 3. P. 15–28. <https://doi.org/10.31545/aagr/114016>.

Long Jiang-xue, Cheng Hui-yan, Dai Zhi-neng, Liu Jian-fu. The Effect of Silicon Fertilizer on The Growth of Chives. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 192. P. 1–6.

Sinkovič L., Deželak M., Kopinč R., Meglič V. Macro/microelements, nutrients and bioactive components in common and Tartary buckwheat (*Fagopyrum spp.*) grain and stone-milling fractions. *LWT*. 2022. Vol. 161. P. 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113422>.

References (translated & transliterated)

Viniukov, O.O., Bondareva, O.B., Sipun, O.L., & Mamiedova, E.I. (2014). Suchasni orhanichni tekhnologii – shliakh ekolohizatsii silskohospodarskoho vyrobnytstva [Modern organic technologies are a way of greening agriculture]. *Ahrarnyi visnyk Pivdnia [Agrarian Herald of the South]*, 1, 74–78 [in Ukrainian].

Volkohon, V.V., Nadkernychna, O.V., & Kovalevska, T.M. (2006). Mikrobni preparaty u zemlerobstvi. Teoriia i praktyka [Microbial preparations in agriculture. Theory and practice]. Kyiv. *Ahrarna nauka*, 312 [in Ukrainian].

Horash, O.S., & Khomina, V.Ia. (2009). Reaktsiia sortiv hrechky na rehulatory rostu roslyn [The reaction of buckwheat varieties to plant growth regulators]. *Visnyk ahrarnoi nauky [Herald of Agrarian Science]*, 5, 45–47 [in Ukrainian].

Kabanets, V.M. & Strakholis, I.M. (2017). Ahrotekhnichni pryomy vyroshchuvannya krupianykh kultur dlia umov pivnichno–skhidnoho Lisostepu Ukrainy [Agrotechnical methods of growing cereal crops for the conditions of the northeastern forest–steppe of Ukraine]. Instytut silskoho hospodarstva Pivnichnoho Skhodu NAAN. Sad, 20 [in Ukrainian].

Radchenko, M.V., Butenko, A.O., & Hlupak, Z.I. (2018). Vplyv systemy udobrennia ta efektyvnist rehulatora rostu na produktyvnist hrechky v umovakh pivnichno-skhidnoho lisostepu Ukrainy [The influence of the fertilization system and the effectiveness of the growth regulator on the productivity of buckwheat in the conditions of the Northeastern Forest-Steppe of Ukraine]. *Ukrainian Journal of Ecology*, 8 (2), 89–94. <https://doi.org/10.15421/2018.314> [in Ukrainian].

Tkachyk, S.O. (2014). Metodyka provedennia ekspertyzy sortiv roslyn hrupy zernovykh, krupianykh ta zernobobovykh na prydatnist do poshyrennia v Ukraini [Methodology for examination of plant varieties of the cereal, grain and leguminous group for suitability for distribution in Ukraine]. TOV «Nilan-LTD». Kyiv, 82 [in Ukrainian].

Tokmakova, L.M. (2008). Mikrobiolohichni zasoby polipshennia fosfornoho zhyvlennia roslyn ta pidvyshchennia produktyvnosti silskohospodarskykh kultur [Microbiological means of improving phosphorus nutrition of plants and increasing the productivity of agricultural crops]. *Posibnyk ukrainskoho khliboroba [Handbook of the Ukrainian farmer]*, 120–122 [in Ukrainian].

Tryhub, O.V., Kutsenko, O.M., Liashenko, V.V., & Nohin, V.V. (2022). Vazhlyvist vyroshchuvannya hrechky yak unikalnoi y ekolohichno orientovanoi kultury [The importance of growing buckwheat as a unique and ecologically oriented crop]. *Scientific Progress & Innovations*, 1, 69–76. <https://doi.org/10.31210/visnyk2022.01.08> [in Ukrainian].

Tsarenko, O.M., Zlobin, Yu.A., Skliar, V.H., & Panchenko, S.M. (2000). Kompiuterni metody v silskomu hospodarstvi ta biolohii: Navchalnyi posibnyk [Computer methods in agriculture and biology: Training manual]. Sumy. Universytetska knyha, 203 [in Ukrainian].

Yakovets, L.A., & Solomon, A.M. (2023). Hospodarsko-biolohichna otsinka sortiv hrechky za nektaroproduktyvnistiu zalezho vid faktoriv intensyfikatsii zemlerobstva [Economic and biological assessment of buckwheat varieties for nectar productivity depending on the factors of agricultural intensification]. *Silske hospodarstvo ta lisivnytstvo [Agriculture and forestry]*, 1 (28), 195–209. <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2023-1-14> [in Ukrainian].

Bielski, S., Marks-Bielska, R., & Wiśniewski, P. (2022). Investigation of energy and economic balance and GHG emissions in the production of different cultivars of buckwheat (*Fagopyrum esculen-*

tum Moench): A case study in Northeastern Poland. *Energies*, 16 (1), 17. <https://doi.org/10.3390/en16010017> [in English].

Jaroszewska, A., Sobolewska, M., Podsiadło, C., & Stankowski, S. (2019). The effect of fertilization and effective microorganisms on buckwheat and millet. *Acta Agroph*, 26 (3), 15–28. <https://doi.org/10.31545/aagr/114016> [in English].

Long, Jiang-xue, Cheng, Hui-yan, Dai, Zhi-neng, & Liu, Jian-fu. (2018). The Effect of Silicon Fertilizer on The Growth of Chives. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 192, 1–6 [in English].

Sinkovič, L., Deželak, M., Kopinč, R., & Meglič, V. (2022). Macro/microelements, nutrients and bioactive components in common and Tartary buckwheat (*Fagopyrum spp.*) grain and stone-milling fractions. *LWT*, 161, 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113422> [in English].

Отримано: 26.04.2024

Прийнято: 03.05.2024



УДК 633.11:631.5(292.485)(477)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.21>

**ЗАЛЕЖНІСТЬ ПОЛЬОВОЇ СХОЖОСТІ
ТА ВИЖИВАННЯ РОСЛИН НАГІДОК ЛІКАРСЬКИХ
(*CALENDULA OFFICINALIS L.*) ВІД ЧИННИКІВ ВЕГЕТАЦІЇ
ТА АГРОТЕХНІЧНИХ ПРИЙОМІВ
В УМОВАХ ПРАВОБЕРЕЖНОГО ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ**

Т. О. Падалко¹

Нагідки лікарські (*Calendula officinalis L.*) – рослина, що росте в Середземноморському регіоні, впродовж століть вирощувалася як лікарська та декоративна. Дослідження було проведено з використанням зареєстрованих сортів Сонячна красуня та Радіо в умовах Правобережного Лісостепу України. В роки проведення експериментальних досліджень (2018–2023 рр.) вивчено сортову екологічну стійкість, опрацьовано забезпечення високої схожості насіння та виживання рослин нагідок лікарських, оцінено лікарську сировину та окреслено перспективи використання залежно від окреслених технологічних прийомів. Встановлено, що рослини *C. officinalis* суттєво реагують на ґрунтово-кліматичні умови регіону, що зумовлює нерівномірність сходів, тому необхідною умовою постало питання проведеного дослідження, спрямованого на зростання енергії проростання насіння і дружності сходів. Обґрунтовано агробіологічні особливості культивування рослин нагідок лікарських, що найбільше використовують у офіційній та народній медицині, завдяки наявності у складі різноманітних біологічно активних речовин. Отримано такі дані: період вегетації *C. officinalis* переважно залежав від строків сівби, тривалість коливалася в межах 80–107 діб; польова схожість рослин за 2018–2023 рр. знаходилася в межах 86,94–70,50%; максимальний показник виживання рослин наприкінці вегетації становив 94%, який отримано на варіанті ранньовесняного строку сівби (15–8.04) сорту Сонячна красуня, мінімальний показник – 81,54% – за ранньовесняного строку сівби (1–4.05) сорту Радіо; показник схожості і виживання в середньому за роки досліджень перевищував контроль на 3%. Сьогодні ця культура є поширеною і культивується незалежно від перших закладених територій вирощування та існуючих дослідних станцій лікарських рослин, як культура широкого спектра використання сировинної бази в Україні і за кордоном.

Ключові слова: нагідки лікарські, сорт, строк сівби, агроекологічні умови, польова схожість та виживання рослин, чинники вегетації.

¹ доктор філософії з спеціальності 201 «Агрономія», асистент кафедри садівництва і виноградарства (Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський) e-mail: krivapadalko@gmail.com orcid:0000-0001-9299-3721

DEPENDENCE OF FIELD SIMILARITY AND SURVIVAL OF *CALENDULA OFFICINALIS* L. PLANTS ON VEGETATION FACTORS AND AGROTECHNICAL PRACTICES IN THE CONDITIONS OF THE RIGHT BANK FOREST STEPPE OF UKRAINE

T. O. Padalko

Calendula (*Calendula officinalis* L.) is a plant that grows in the Mediterranean region and has been cultivated as a medicinal and decorative plant for centuries. The research was conducted using the registered varieties Sunny beauty and Radio in the conditions of the Right Bank Forest Steppe of Ukraine. During the years of experimental research (2018–2023), varietal ecological stability was studied, ensuring high seed germination and plant survival of medicinal plants was worked out, medicinal raw calendula were evaluated and prospects for use were outlined depending on the outlined technological methods. It was established that *C. officinalis* plants react significantly to the soil and climatic conditions of the region, which causes the unevenness of seedlings, therefore, the issue of the conducted research aimed at increasing the energy of seed germination and friendship of seedlings became a necessary condition. The agrobiological features of the cultivation of medicinal plants, which are most widely used in official and folk medicine, due to the presence of various biologically active substances in their composition, are substantiated. The following data were obtained: the vegetation period of *C. officinalis* mainly depended on the sowing time, the duration varied between 80 and 107 days; the field similarity of plants for 2018–2023 was in the range of 86.94–70.50%; the maximum rate of plant survival at the end of the growing season was 94%, which was obtained on the option of the early spring sowing period (April 15–18) of the Sunny Beauty variety, the minimum rate – 81.54% – for the early spring sowing period (1–4.05) of the Radio variety; the rate of similarity and survival on average over the years of research exceeded the control by 3%. Today, this culture is widespread and is cultivated independently of the first established areas of cultivation and existing research stations of medicinal plants, as a culture of a wide range of use of the raw material base in Ukraine and abroad.

Key words: calendula, variety, sowing time, agro-ecological conditions, field germination and plant survival, vegetation factors.

Вступ

Нагідки лікарські (*Calendula officinalis* L.) – цінна лікарська та декоративна рослина, заввишки до 75–80 см, корінь стрижневий, гіллястий, стебло прямостояче, від основи розгалужене, ребристе, покрите короткими, жорсткими, у верхній частині волосками, листя чергове світло-зелене, завдовжки до 15 см, з ледве помітними зубчиками, квіти зібрані у великі кошики в діаметрі до 9 см, розташовані поодинокі на кінці стебла та його розгалуженнях, крайові квітки язичкові, від жовтого до яскраво-жовтогарячого забарвлення, розташовані в 10 рядів (прості та махрові); серединні – трубчасті, двостатеві. Розрізняють черепичасту, хризантемоподібну, променисту, анемоновидну і герберовидну форму суцвіть (Мельничук і Богуславський, 2013). Належить до родини Asteraceae, рід нараховує до 25 видів, серед яких найбільш розповсюджені *C. officinalis*, *C. arvensis*, *C. tripterocarpa*, *C. stellata* та *C. Suffruticosa* (Мельничук і Куценко, 2015).

Якістю сировини хімічного складу і кількісного вмісту діючих речовин є квіти та

листя рослин, але, при заготівлі їх собівартість є вищою у порівнянні із травою, яка складається із квітів, стебел та листків. З технологічної точки зору цей вид лікарської РС є дуже зручним при використанні в промислових масштабах. Основними БАР нагідок лікарських є фенольні сполуки (флавоноїди, гідроксикоричні кислоти, таніни) та терпеноїди (етерна олія), дубильні речовини, фітонциди, сапоніни, глікозиди, біциклічні монотерпенові сполуки, як камфора, камфен і борнеол. Дослідники виявили в рослині антиоксиданти, калій, кальцій, магній і залізо, такі мікроелементи, як хром, алюміній, селен, нікель, стронцій, марганець, мідь, цинк, свинець. Суцвіття рослини багате цинком, міддю, молібденом, селеном завдяки наявності ефірних масел і смолистих речовин, що надають гіркий запах. Органічні кислоти, такі як яблучна та саліцилова кислоти, разом із каротином сприяють яскравому помаранчевому забарвленню квітів (Shahane et al., 2023).

Унікальний склад суцвіття *Calendula officinalis* володіє багатьма лікувальними властивостями, зокрема, протизапальною,

протимікробною дією, пришвидшує епітелізацію при виразках та атонічних шкірних ранах, має седативну, також в'язучу, жовчогінну і спазмолітичну дію, є стабілізатор підвищеного артеріального тиску та стимулятор роботи серцевого м'яза. Екстракт в поєднанні з іншими лікарськими травами (ромашки, ехінацеї, м'яти та ін.) може використовуватися в косметології (Padalko et al., 2021).

Чи не найважливішим на даний час стоїть питання використовувати всі вивчені можливості одержання культури клітин і тканин нагідок лікарських *in vitro*. Бачимо згідно проведених досліджень, що листки, суцвіття і трава можуть розглядатись як перспективні джерела при виробництві нових ЛЗРП з антимікробною та антиоксидантною дією (Savić & Gajić, 2021).

Для рослин *C. officinalis* важливою зовнішньою морфологічною ознакою є тип суцвіття, цвіте з червня до кінця вересня, однак масове цвітіння спостерігається у липні-серпні. Наприкінці ХХ ст. щорічна заготівля ЛРС становила приблизно 200 т, однак ця кількість лише на третину задовольняла потреби держави в сировині (Muzaffer Barut & Leyla Sezen Tansi, 2024).

Плід – вигнуті сім'янки, завдяки такій своєрідній формі плодів рослини нагідок одержали в народі назву «нігтики». Так, досліджуючи насіння цієї культури, Яковлєвою-Носарь С.О. проведено аналіз основних фракцій, що формують насіння гачкуватої (дрібне, завдовжки 5–10 мм, з масою 1000 штук до 8 г), ближче до краю кошиків розташовуються насіння човноподібної (велике, завдовжки 10–20 мм, що мають найбільшу масу 1000 насінин (15 г) за рахунок широких «крил»), а біля самого краю кошиків формується насіння серповидної (довге (завдовжки до 25 мм), але позбавлене «крил», оскільки мають середню масу 1000 штук до 11 г), тобто зовнішні – серповидновигнуті (кігтеподібні), найбільші, завдовжки до 2–3 см; серединні – дугоподібні (човноподібні), завдовжки 1–2 см; внутрішні – кільцеподібні, завдовжки 0,5–1 см (Яковлєва-Носарь, 2018). Також, аналізуючи інші класифікації, виділяють гетерокарпічне насіння: кільцеподібне, кігтеподібне, човноподібне. Зовнішні сім'янки найбільші, завдовжки до 2–3 см, серповидно-вигнуті (кігтеподібні), жовтувато-бурі; на їх спинному боці і довгому, зверненому всередину, носику є поздовжні ряди шипиків. Серединні сім'янки дугоподібні (човноподібні), зав-

довжки 1–2 см, світло-бурі, на спинці гостро-горбкуваті, всередині – подібні до кіля. Внутрішні сім'янки кільцеподібні (гачкуваті), завдовжки 0,5–1 см, темно-бурі, зі спинної сторони горбкуваті або шипуваті. Кількісне співвідношення трьох типів насіння, фракцій у кошику залежить від кількості рядів насіння. У немахрових суцвітть з 2–3 рядами зовнішнє гачкувате насіння складає 40% від загальної кількості насіння в суцвітті, середнє човноподібне 35%, серповидне 25%. У міру збільшення кількості рядів кількість гачкуватого насіння збільшується, а човноподібного і серповидного – зменшується. У повністю махрових суцвіттях (з кількістю рядів насіння понад 9) майже все (понад 90%) насіння гачкувате, розташовується в суцвітті щільно. Максимально можлива глибина сівби насіння без погіршення схожості має практичне значення в технології вирощування нагідок лікарських. Перш за все, це пов'язано з вологістю верхнього шару ґрунту, який при сухій сонячній погоді після посіву швидко висушується (Яковлєва-Носарь, 2018; Державний ..., 2024).

Метою є опрацювання забезпечення високої схожості насіння нагідок лікарських залежно від сорту, ранньовесняного строку сівби при оптимальній нормі висіву насіння в умовах Правобережного Лісостепу України.

Матеріал і методи

Вивчення елементів технології вирощування рослин *C. officinalis* проводили шляхом закладання польових дослідів упродовж 2018–2023 рр. у сівзміні зернових культур, згідно із загальноприйнятою методикою (Рошков та ін., 2016).

Фенологічні спостереження проводили на основних етапах росту і розвитку рослин відповідно до «Методики сортовипробування сільськогосподарських культур». Структуру посівів визначали шляхом біологічного аналізу чотирьох повторних пробних площ по 1 м² у різних місцях. Статистичну обробку результатів проводили методом дисперсійного аналізу з використанням програмних пакетів Agrostat і Statistica 10.0.

Схема експерименту включала: фактор А – сорти: Сонячна красуня та Радіо, внесені до українського та німецького реєстрів сортів рослин; оптимальна норма висіву: 8 кг/га; температура ґрунту: 6–8 °С; на глибину 2–3 см; фактор Б: строк сівби: ранньовесняний (1–3.04 (контроль), 15–18.04, 1–4.05).

Агрохімічні показники ґрунту визначали за такими методиками: рН_{sol} – 1 N HCl екстр-

акт, загальні обмінні основи за Каппеном, вміст гумусу за І.В. Тюрніним, рухомих форм фосфору та калію за Кірсановим, азоту за Корфілдом. Загалом ґрунти дослідних ділянок характеризуються високою забезпеченістю макроелементами, такими як фосфор, калій та азот, і слабокислим рН 5,2–5,7 (Паньків, 2017).

При підготовці насіння до сівби наданого зразка відбирали 1000 цільних одиниць насіння *S. officinalis* та зважували його на аналітичних вагах, як описано у ДСТУ 4138–2002 (ДСТУ ..., 2003). Для кожного варіанту досліду, який включав не менше чотирьох повторностей, брали 100 насінин *S. officinalis* та замочували їх на 8 год у дистильованій воді (контроль) та розчинах, що містили різні норми мікродобрива (25; 50; 150 і 200 мл/т насіння). Після замочування, насіння позбавляли слідів зайвої вологи та поміщали у ємкості з фільтрувальним папером, зволеним до 80% дистильованою водою, як описано. Енергію проростання (ЕП) насіння *S. officinalis* визначали шляхом його культивування «на папері» упродовж 3 діб у термостаті при 20 °С за умов вентиляції, як описано. Лабораторну схожість насіння *S. officinalis* визначали шляхом його культивування «на папері» упродовж 7 діб при 20 °С за умов природного освітлення. Польову схожість насіння *S. officinalis* визначали на 7 добу після його посіву на навчально-дослідній ділянці (НДД). Виразили енергію проростання (ЕП) та лабораторну й польову схожість насіння *S. officinalis* за кількістю пророслих насінин чи кількістю проростків, відповідно, у відсотках до загальної кількості насіння, взятого для пророщування (Сухар і Хоміна, 2015; Клепач та ін., 2022).

Результати

Дослідження показали, що сівба насіння нагідок лікарських у різні строки суттєво впливає на польову схожість. Було встановлено, що строк сівби впливає на реалізацію ресурсного потенціалу, таким чином, створюються більш сприятливі умови для розвитку рослин, що дає змогу максимально використати ресурси довкілля ранньою весною та забезпечує більш високу виживаність в подальшому. Одним із чинників, що визначає структуру врожаю насіння, є густота рослин на одиницю площі. Культура адаптована до типового рельєфу, типів ґрунтів, клімату та умов зростання в регіоні (табл. 1).

Насіння почало сходити на 7–14 день після сівби. Повні сходи з'явилися у третій декаді квітня. Міжфазний період (сходи – бутонізація) тривав 30–50 діб. Тривалість фази цвітіння по сортах становила 28 діб. Міжфазний період бутонізація-початок цвітіння рослин сорту Сонячна красуня коливався за роками у межах від 10 до 12 діб, у сорту Радіо від 11 до 14 діб. Повне цвітіння у рослин досліджуваних сортів наступало через 2–3 доби від початку цвітіння. Вегетаційний період рослин у середньому за роки досліджень становив незалежно від сорту – 80–107 діб (Padalko, 2024).

Від показників схожості насіння та енергії проростання залежить посівна якість, густина посіву, дружність сходів, рівномірність розподілу на полі стеблостою, що, значною мірою, залежить від зональних особливостей, ґрунтово-кліматичних умов та технології вирощування. Тому, аналізуючи вище викладене, стверджуємо, що лабораторна схожість насіння *S. officinalis* коливається у межах 70,28–91,09%, різниця між контролем становить близько 2%. Як бачимо, польова схожість є високою по варіантам досліду, середнє значення вибірки сягало 80,2% сорту Сонячна красуня за ранньовесняного строку сівби (15–18.04), при кількості висіяного насіння 363,35 тис. шт/га цей показник на 3% перевищував сорт Радіо. Суттєвим показником є ступінь виживання рослин (рис. 1), де найвищим 94% є кращий варіант, дещо поступається 91,26% сорт Радіо, в результаті чого між варіантами досліду встановлено істотну різницю.

Обговорення

Польова схожість істотно впливає на формування врожайності загалом. Як правило, вона значно нижча лабораторної і залежить від взаємодії агротехнічних, ґрунтових, метеорологічних умов, форми та якості насіння. У роки досліджень польова схожість варіювала від 73,9 до 94%, максимальну густоту сходів на варіанті (15–18.04) забезпечив сорт Сонячна красуня – 421 тис. шт/га, що на 19 од. різнився від кількості висіяних схожих насінин. Зокрема, кількість рослин на час повних сходів у сорту Радіо знижувалася із 404 тис. шт/га на контролі до 235 тис. шт/га на варіанті ранньовесняного строку сівби. Найбільший показник виживання рослин у досліді становив 94% у сорту Сонячна красуня, найменше рослин 81,54% відмічено в сорту Радіо за ранньовесняного строку (1–4.05), що є досить вагомим результатом.

Таблиця 1

Залежність польової схожості насіння нагідок лікарських (*Calendula officinalis* L.) залежно від сорту і ранньовесняного строку сівби, % (2018–2023 рр.)

Строк сівби (фактор В) Ранньовесняний	Рік	Сорт (фактор А)									
		Сонячна красуня (<i>Sunny beauty</i>) (К)					Радіо (<i>Radio</i>)				
		Енергія проростання насіння, %	Лабораторна схожість насіння, %	Кількість висіяного насіння, тис. шт./га	Густота стояння рослин, тис. шт./га	Польова схожість, насіння, %	Енергія проростання насіння, %	Лабораторна схожість насіння, %	Кількість висіяного насіння, тис. шт./га	Густота стояння рослин, тис. шт./га	Польова схожість, насіння, %
1 – 3.04 (К)	2018	73	76,34	276,0	236,82	75,45	73	73,01	255,91	235,0	70,52
	2019	75	77,12	295,50	244,50	73,64	74	75,13	273,9	232,14	72,11
	2020	76	80,08	324,32	294,87	77,07	75	78,28	303,33	300,38	76,41
	2021	78	79,44	303,90	253,90	78,06	77	71,22	295,0	265,0	69,96
	2022	77	80,96	312,02	309,72	77,35	77	77,34	300,58	295,8	75,33
	2023	80	89,22	413,0	393,0	84,99	79	82,44	401,18	384,22	80,0
\bar{X}		76,5	80,53	320,79	288,8	77,76	75,8	76,24	304,98	236,12	74,05
$V, \%$		3,2	5,7	-	-	4,99	2,9	5,3	-	-	5,2
15 – 18.04	2018	76	80,93	320,0	298,51	79,63	76	79,73	306,51	285,0	76,12
	2019	81	79,99	314,56	268,0	77,54	79	76,00	310,64	255,8	74,98
	2020	80	81,26	338,0	327,54	74,18	80	77,02	324,52	314,56	73,94
	2021	78	84,49	365,32	354,0	80,72	75	80,09	346,60	334,66	77,61
	2022	81	86,98	398,24	384,12	82,17	78	83,54	365,9	347,0	79,32
	2023	82	91,09	444,0	421,0	86,94	80	89,0	410,0	404,0	84,89
\bar{X}		80,3	84,12	363,35	342,2	80,2	79,0	80,9	344,03	323,37	77,81
$V, \%$		2,9	5,1	-	-	5,4	2,7	5,8	-	-	5,1
1 – 4.05	2018	69	74,38	246,0	216,0	72,97	69	75,99	245,0	206,78	70,50
	2019	70	76,99	271,19	221,19	75,09	70	74,04	268,55	214,29	73,09
	2020	74	78,81	294,42	244,42	76,42	73	76,03	273,0	240,41	75,53
	2021	73	73,97	254,0	204,0	70,08	71	70,28	246,82	200,9	69,84
	2022	75	80,00	320,0	299,0	78,22	74	78,39	316,58	264,50	76,39
	2023	78	84,93	369,7	349,7	80,64	75	82,74	354,0	326,87	78,0
\bar{X}		73,2	78,18	292,55	255,72	75,57	72,0	76,24	284	242,3	73,9
$V, \%$		4,5	5,2	-	-	4,97	3,3	5,4	-	-	4,46

Висновки

Доведено, що при різних агротехнічних прийомах показники схожості насіння та виживання рослин змінюються у досить широких межах. При подальших досліджен-

нях доцільним є визначення залежності урожайності та посівних якостей насіння від вмісту в ґрунті елементів живлення як наслідок одержання високих врожаїв якісного насіння.

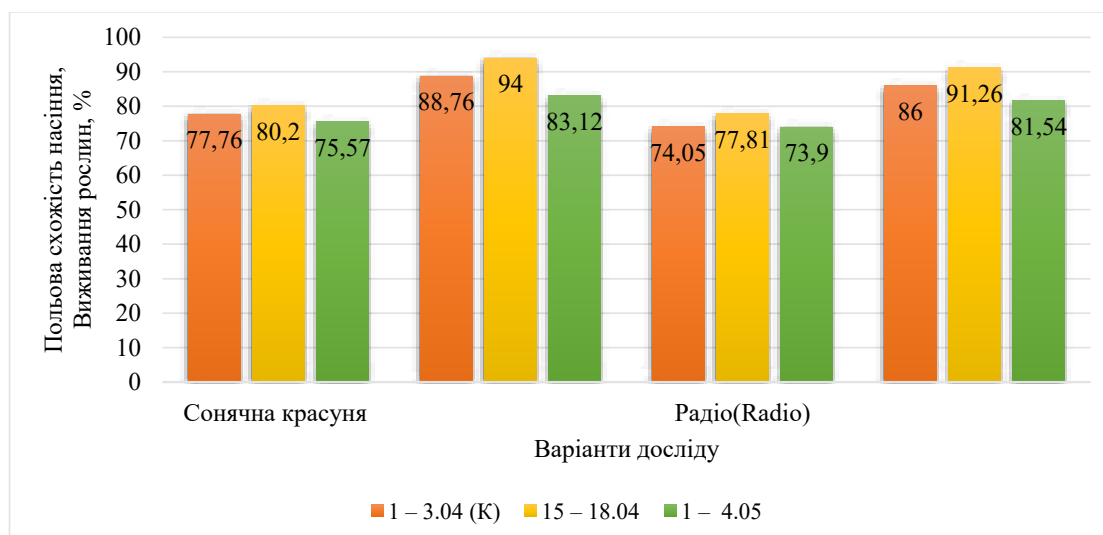


Рис. 1. Польова схожість насіння від ступеня виживання рослин нагідок лікарських (*Calendula officinalis* L.)

Список використаної літератури

Державний реєстр сортів рослин, придатних для поширення в Україні у 2024 році. Міністерство аграрної політики та продовольства України. Київ, 2024. (499). [Електронний ресурс]. URL: <https://sops.gov.ua/geestr-sortiv-roslin> (дата звернення 2.04.2024).

ДСТУ 4138–2002. Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості; чинний від 01.01.04. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України. 2003. 173 с. [Електронний ресурс]. URL: https://www.agrodialog.com.ua/wp-content/uploads/2018/04/dstu-4138_2002.pdf (дата звернення 15.03.2024).

Клепач Г.М., Лупак О.М., Шпек М.П., Дякунчак М., Ковальчук Г.Я. Вплив передпосівної обробки мікродобривом “Аватар-2 Органік” на лабораторну та польову схожість насіння *Calendula officinalis* L. *Acta Carpathica*. 2022. № 1 (37). С. 27–39. <https://doi.org/10.32782/2450-8640.2022.1.2>.

Мельничук Р.В., Богуславський Р.А. Генетичне різноманіття ознакової колекції роду *Calendula* L. як джерело вихідного матеріалу для селекції. *Генетичні ресурси рослин*. 2013. № 12. С. 41–52.

Мельничук Р.В., Куценко Н.І. Оцінка різноманіття роду *Calendula* для формування колекції сортів з еталонними ознаками. *Сортовивчення та охорона прав на сорти рослин*. 2015. № 3–4 (28–29). С. 18–23. [https://doi.org/10.21498/2518-1017.3-4\(28-29\).2015.58441](https://doi.org/10.21498/2518-1017.3-4(28-29).2015.58441).

Паньків З.П. Ґрунти України: навчально-методичний посібник. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2017. С. 22.

Рожков А.О., Пузік В.К., Каленська С.М. Дослідна справа в агрономії: навч. посіб: у 2 кн. Кн. 1. *Теоретичні аспекти дослідної справи*. Харків: Майдан, 2016. С. 167–169.

Сухар С.В., Хоміна В.Я. Удосконалення елементів технології вирощування нагідок лікарських в умовах Лісостепу західного: монографія. Ніжин: ПП «Лисенко», 2015. 144 с.

Яковлєва-Носарь С.О. Вплив посухи та засолення на характеристики проростання насіння й інтенсивність росту проростків *Calendula officinalis* L. *Актуальні питання біології, екології та хімії*. 2018. Том 15. № 1. С. 27–39. [Електронний ресурс]. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/apd_2018_15_1_5 (дата звернення 15.03.2024).

Muzaffer Barut, Leyla Sezen Tansi. Elucidating the flower, seed yield and phytochemical variability of marigold (*Calendula officinalis* L.) in response to winter sowing at different harvest intervals and dates. *South African Journal of Botany*. 2024. Volume 166. pp. 191–207. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.01.043>.

Padalko T.O. Dynamics of growth and development of *Calendula* plants (*Calendula officinalis* L.) according to the duration and phases of vegetation in the conditions of the Right Bank Forest Steppe of Ukraine. *International periodic scientific journal: “ScientificWorldJournal”* Bulgaria.

2024. Vol. 23, no. 2. P. 72–78. Indexed in Indexcopernicus high impact factor (ICV: 87). <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2024-23-00-055>.

Padalko T.O., Bakhmat M.I., Ovcharuk O.V., Horodyska O.P. Quality of raw material from camomile inflorescences depending on technological factors. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2021. Vol. 11 (1). P. 234–240. ISSN: 2520-2138. https://doi.org/10.15421/2021_35.

Savić I.M., I.M.S. Gajić. Physical, chemical and antioxidant stability studies of a topical formulation containing pot marigold (*Calendula officinalis* L.) flowers extract. *Adv. Technol.* 2021. Vol. 10 (1). 11–19. <https://doi.org/10.5937/savteh2101011S>.

Shahane K., Kshirsagar M., Tambe S., Jain D., Rout S., Ferreira M.K.M., Mali S., Amin P., Srivastav P.P., Cruz J., Lima R.R. An Updated Review on the Multifaceted Therapeutic Potential of *Calendula officinalis* L. *Pharmaceuticals (Basel)*. 2023. Apr 18. 16 (4). 611. <https://doi.org/10.3390/ph16040611>. PMID: 37111369; PMCID: PMC10142266.

References (translated & transliterated)

Derzhavnyj rejestr sortiv roslyn, prydatnykh dlja poshyrennja v Ukrajinu u 2024 roci [State register of plant varieties suitable for distribution in Ukraine in 2024]. *Ministerstvo aghrarnoji polityky ta prodovoljstva Ukrainy*. Kyiv, (499). [Electronic resource] URL: <https://sops.gov.ua/reestr-sortiv-roslyn> (access date 2.04.2024) [in Ukrainian].

DSTU 4138–2002. Nasinnja siljsjoghospodarsjkykh kuljtur. Metody vyznachennja jakosti; chynnyj vid 01.01.04. [DSTU 4138–2002. Seeds of agricultural crops. Methods of determining quality; valid from 01.01.04]. *Vyd. ofic. Kyjiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy*, 2003. 173. [Electronic resource] URL: https://www.agrodialog.com.ua/wp-content/uploads/2018/04/dstu-4138_2002.pdf (access date 15.03.2024) [in Ukrainian].

Klepach, Gh.M., Lupak, O.M., Shpek, M.P., Djakunchak, M., & Kovalchuk, Gh.Ja. (2022). Vplyv peredposivnoji obrobky mikrodobryvom «Avatar-2 Orghanik» na laboratornu ta poljovu skhozhistj nasinnja *Calendula officinalis* L. [The influence of pre-sowing microfertilizer «Avatar-2 Organic» on laboratory and field seed germination *Calendula officinalis* L.]. *Acta Carpathica*, 1 (37), 27–39. <https://doi.org/10.32782/2450-8640.2022.1.2> [in Ukrainian].

Meljnychuk, R.V., & Boghuslavskij, R.L. (2013). Ghenetychne riznomanittja oznakovoji kolekciji rodu *Calendula* L. jak dzhereło vykhidnogho materialu dlja selekciji [Genetic diversity of the characteristic collection of the genus *Calendula* L. as a source of raw material for selection]. *Ghenetychni resursy roslyn [Genetic resources of plants]*, 12, 41–52 [in Ukrainian].

Meljnychuk, R.V., & Kucenko, N.I. (2015). Ocinka riznomanittja rodu *Calendula* dlja formuvannja kolekciji sortiv z etalonnymy oznakamy [Evaluation of the diversity of the genus *Calendula* for the formation of a collection of varieties with reference characteristics]. *Sortovyvchennja ta okhorona prav na sorty roslyn [Varietal research and protection of rights to plant varieties]*, 3–4 (28–29), 18–23. [https://doi.org/10.21498/2518-1017.3-4\(28-29\).2015.58441](https://doi.org/10.21498/2518-1017.3-4(28-29).2015.58441) [in Ukrainian].

Panjktiv, Z.P. (2017). Grunty Ukrainy: navchaljno-metodychnyj posibnyk [Soils of Ukraine: educational and methodological manual]. Lviv: LNU imeni Ivana Franka [in Ukrainian].

Rozhkov, A.O., Puzik, V.K., & Kalensjka, S.M. (2016). Doslidna sprava v aghronomiji: navch. posib: u 2 kn. Kn. 1 [Research case in agronomy: teaching. manual: in 2 books Book 1]. *Teoretychni aspekty doslidnoji spravy [Theoretical aspects of the research case]*. Kharkiv: Majdan [in Ukrainian].

Sukhar, S.V., & Khomina, V.Ja. (2015). Udoshkonalennja elementiv tekhnologhiji vyroshhuvannja naghidok likarsjkykh v umovakh Lisostepu zakhidnogho: monoghrafija [Improving the elements of the technology of growing medicinal plants in the conditions of the Western Forest Steppe: a monograph]. Nizhyn: PP «Lysenko» [in Ukrainian].

Jakovljeva-Nosarj, S.O. (2018). Vplyv posukhy ta zasolennja na kharakterystyky prorostannja nasinnja j intensyvnistj rostu prorostkiv *Calendula officinalis* L. [The influence of drought and salinity on the characteristics of seed germination and growth intensity of seedlings of *Calendula officinalis* L.]. *Aktualjni pytannja biologhiji, ekologhiji ta khimiji [Current issues of biology, ecology and chemistry]*, Tom 15, 1, 27–39 [in Ukrainian].

Muzaffer Barut, & Leyla Sezen Tansi (2024). Elucidating the flower, seed yield and phytochemical variability of marigold (*Calendula officinalis* L.) in response to winter sowing at different harvest intervals and dates. *South African Journal of Botany*, 166, 191–207. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.01.043> [in English].

Padalko, T.O. (2024). Dynamics of growth and development of plants (*Calendula officinalis* L.) according to the duration and phases of vegetation in the conditions of the Right Bank

Forest Steppe of Ukraine. *International periodic scientific journal: «Scientific World Journal»*, vol. 23, no. 2, 72–78. Indexed in Indexcopernicus high impact factor (ICV: 87). <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2024-23-00-055> [in English].

Padalko, T.O., Bakhmat, M.I., Ovcharuk, O.V., & Horodyska, O.P. (2021). Quality of raw material from camomile inflorescences depending on technological factors. *Ukrainian Journal of Ecology*, 11 (1), 234–240. ISSN: 2520-2138. https://doi.org/10.15421/2021_35 [in Ukrainian].

Savić, I.M., & I.M.S., Gajić. (2021). Physical, chemical and antioxidant stability studies of a topical formulation containing pot marigold (*Calendula officinalis* L.) flowers extract. *Adv. Technol.*, 10 (1), 11–19. <https://doi.org/10.5937/savteh2101011S> [in English].

Shahane, K., Kshirsagar, M., Tambe, S., Jain, D., Rout, S., Ferreira, M.K.M., Mali, S., Amin, P., Srivastav, P.P., Cruz, J., & Lima, R.R. (2023). An Updated Review on the Multifaceted Therapeutic Potential of *Calendula officinalis* L. *Pharmaceuticals (Basel)*, apr 18. 16 (4), 611. <https://doi.org/10.3390/ph16040611>. PMID: 37111369; PMCID: PMC10142266 [in English].

Отримано: 17.04.2024

Прийнято: 22.04.2024



ЕКОЛОГІЯ

UDC 502/504

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.22>

COMPARISON OF BIOMETRIC CHARACTERISTICS OF OXYTREE PLANTING IN TRAFFIC ROUTES IN THE CITY OF LOMZA IN 2019–2020

A. Borusiewicz¹, K. Cieslinski², J. Lisowski³, H. Porwisiak⁴

As part of the tripartite agreement signed on 16 April 2019 between Miejskie Przedsiębiorstwo Gospodarki Komunalnej i Mieszkaniowej Zakład budżetowy w Łomży (Municipal Utilities and Housing Company Budgetary Facility in Lomza), Instytut Ochrony Roślin Państwowym Instytut Badawczy w Białymstoku (Institute for Plant Protection of National Research Institute in Białystok) and Wyższa Szkoła Agrobiznesu w Łomży (Higher School of Agribusiness in Lomza), currently Międzynarodowa Akademia Nauk Stosowanych w Łomży (The International Academy of Applied Sciences in Lomza), 51 Oxytree trees were planted in the second half of May 2019 in the city's green belts along urban traffic routes with heavy vehicle traffic.

This paper compares the biometric traits of oxytree plantings in the city of Łomża, in two growing seasons of 2019-2020. The degree of adaptation and growth of this species tree in north-eastern Poland's urban conditions was studied. The growth rate per diameter and trunk height per development of Oxytree in two consecutive growing years were determined.

The average height of how many trees after the first growing year was 95.3 cm, with an average stem diameter of 19 mm measured at 20 cm from the ground. In the second growing year, the average height of the 51 trees was 171.9 cm, with an average stem diameter of 35 mm.

Key words: oxytree, biometric measurements, care, fertilisation.

¹ Assoc. Prof. DSc, Phd, Eng.
(International Academy of Applied Sciences, Lomza)
e-mail: Andrzej.borusiewicz@mans.edu.pl
ORCID: 0000-0002-1407-7530

² Master Eng.
(International Academy of Applied Sciences, Lomza)
e-mail: kcieslinski@gmail.com
ORCID: 0000-0002-6789-6193

³ Doctor of Agricultural, Eng., prof. MANS
(International Academy of Applied Sciences, Lomza)
e-mail: janusz.lisowski@mans.edu.pl
ORCID: 0000-0001-8613-1367

⁴ Master
(International Academy of Applied Sciences, Lomza)
e-mail: henryk.porwisiak@mans.edu.pl
ORCID: 0000-0002-6325-3350

**ПОРІВНЯННЯ БІОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАСАДЖЕНЬ
КИСНЕВОГО ДЕРЕВА НА МАРШРУТАХ РУХУ
В М. ЛОМЖА У 2019–2020 РР.**

А. Борусевич, К. Цеслінський, Дж. Лісовський, Г. Порвізяк

У рамках тристоронньої угоди, підписаної 16 квітня 2019 року між Муніципальною комунальною та житлово-бюджетною установою в Ломжі (Бюджетна установа муніципального комунального господарства та житлово-комунального господарства у Ломжі), Інститутом захисту рослин, Національним науково-дослідним інститутом у Білостоку (Інститут захисту рослин Національного науково-дослідного інституту у Білостоку) та Вищою школою агробізнесу в Ломжі (нині Міжнародна академія прикладних наук у Ломжі), 51 кисневе дерево було висаджено у другій половині травня 2019 року в зелені смуги міста вздовж міських транспортних магістралей з інтенсивним транспортним рухом.

У цій статті порівнюються біометричні характеристики насаджень кисневих дерев у місті Ломжа за два сезони вегетації 2019–2020 рр. Вивчено ступінь адаптації та зростання цього виду дерев в міських умовах північно-східної Польщі. Було визначено швидкість росту на діаметр і висоту стовбура і на розвиток кисневих дерев протягом двох послідовних років вирощування. Середня висота багатьох дерев після першого року вирощування становила 95,3 см із середнім діаметром стебла 19 мм, виміряним на висоті 20 см від землі. На другий рік вегетації середня висота 51 дерева становила 171,9 см із середнім діаметром стебла 35 мм.

Ключові слова: кисневе дерево, біометричні вимірювання, догляд, розмноження.

Introduction

In the simplest terms, a tree can be defined as a perennial organism with woody stems that branch at a certain height above the ground and differentiate into a trunk and a crown formed above' (Borowski, 2014). Trees have always been and continue to be a natural part of man's immediate environment. Their role in human development is undeniable. It is because they perform various functions, ranging from those related to the development of the economy to their natural and recreational significance to those directly affecting people's mental and physical condition (Bartnicka & Ullman, 2009; Szczypa, 2016). The tree canopy forms an important but all too often disappearing element of urbanised areas (Garczynska et al., 2017). The rate of vegetation dieback in urban agglomerations is one of the most relevant indicators for effectively managing tree resources and entire ecosystems. McPherson (2014) determined indicators to estimate tree mortality. He calculated that under the so-called low mortality, 1% of trees die annually in the first five years and 0.5% in the following thirty years. In contrast, under high mortality, 5% of the stand die each year in the first five years and 2% in the thirty subsequent years. This high rate of plant death significantly reduces the number of trees growing to maturity and dramatically reduces the effects of space management.

The problem of declining green space in cities is essential because vegetation performs

several functions in so-called ecosystem services. Kronenberg (2012) defines these services as the benefits the environment provides to society and the economy. Mizgajski (2008) and Cavender-Bares and co-authors (Cavender-Bares et al., 2015), on the other hand, emphasise that only the proper identification of the inter-mechanisms and interdependencies between the different ecosystem services can improve the ability of human service recipients to manage the landscape better, including the forest stand, in order to guarantee ecosystem biodiversity.

For centuries, the fate of two beings – man and trees – have been constantly intertwined, coexisting and interdependent, with man as *Homo sapiens seemingly* in complete control of this coexistence in order to benefit from it. Even today, due to their longevity, size, and many ecological, cultural, and spatial qualities, trees are essential elements of the landscape of settlements and cities.

Trees in a city are first and foremost about cleaning the atmospheric air of harmful dust, gases and excessive carbon dioxide. It is also about producing oxygen, positively impacting water resources and minimising rainwater run-off, thus preventing flooding.

In phytoremediation, plants take up harmful pollutants from the soil or air, accumulating in their organs. The leaf surface, covered with wax or hairs, can trap dust dangerous to humans and animals. It has been proven that a deciduous stand with a surface area of

1 ha is able, on the principle of 'sticking' to the leaves, to absorb 1.5 to 3 tonnes of dusty substances. At the same time, in the case of very intensive pollution, this absorption increases to as much as 5 tonnes of dust or dust. Plants can reduce the degree of dustiness by up to 75% (Woźny, 2015). Szczepanowska and Sitarski (2015) estimated that over a year, trees in the Praga Północ district collectively removed 316 kg of pollutants from the air.

The most critical biological function of trees in urban conditions is related to reducing the difference in air temperature, minimising the force of winds and limiting the amount of sunlight, in other words, generally mitigating the microclimate in built-up areas. Vegetation, through the process of transpiration and by shading adjacent land and infrastructure components, reduces diurnal temperature fluctuations, preventing the formation of so-called "heat islands" (Szczepanowska et al., 2012; Woźny, 2015; Garczyńska et al., 2017).

For several years, Poland has had a growing interest in cultivating Paulownia trees from Asia. The distinctive feature of these species and the main reason for growers' curiosity is the dynamic growth of these plants and their great adaptability to different climatic conditions.

It has also encouraged breeders and researchers to conduct a great deal of research, resulting in developing hybrids, which are grown successfully, mainly in southern European countries. The great interest in trees of this type is evidenced by statistics provided by various sources, including internet portals and the growers themselves. According to estimates, several hundred thousand Paulownia hybrids have been sold and planted in various areas of Poland. The 'Oxytree' variety alone sold more than 300,000 units, more than half – 160,000 – in 2017. At the same time, other varieties such as 'Cotta Vista 2' and 'Shan Tong' are finding their customers. The high demand among growers for new, foreign varieties of shrubs and trees and the interest of growers determine the need for research in this area. It is also essential to verify the desirability and possibility of introducing these new species in Poland (Jakubowski et al., 2018).

One of the *Paulownia* hybrids of great interest to growers is the hybrid Paulownia Clon in Vitro 112. The tree was bred under laboratory conditions at the turn of the 20th century. It was done at the In Vitro S.L. laboratory in Sant Feliu de Llobregat, near Barcelona, Spain (nursery with identification number

ES-09-08-0016). The hybrid was obtained from the crossing and cloning of two species from the *Paulowniaceae* family, i.e. *Paulownia elongata* and *Paulownia fortunei* (Wozniak et al., 2018; Lisowski & Porwisiak, 2020). Researchers from the Department of Forestry and Genetics at the University of Castilla-La Mancha, Spain, recognised the Clon in Vitro 112 cultivar as the best Paulownia hybrid, giving it the trade name Oxytree, meaning oxygen tree. In doing so, the Spanish researchers highlighted that the plant achieved the best results regarding heat resistance, wood quality and growth rate during their research.

In recent years, sales of oxytree seedlings have been estimated at around 100 000 units per year. It is vital that in Poland, in addition to private plantations, test plantations have been established, the primary purpose of which is to research the adaptation of Clon in Vitro 112 to native climatic conditions. Examples of such test cultures include the experimental plantation in Pawlowice, run under the supervision of the University of Life Sciences in Wrocław, or the experimental plots located at the Higher School of Agribusiness in Łomża (Woźniak et al., 2018; Borusiewicz et al., 2019).

It is worth noting that Oxytree trees are becoming increasingly popular not only among growers, for whom the most important characteristics of these trees are their speed of growth and obtaining a large mass of wood in a short period of time, but they are also beginning to be appreciated as specific 'machines' for absorbing carbon dioxide and producing oxygen in urban areas. Improvements in air quality and their impact on climate change encourage urban green spaces to plant *Clon in Vitro 112* in parks and green belts of transport corridors. Paulownias are also increasingly appearing in the immediate surroundings of manufacturing plants. Examples of urban habitats that have already relied on Oxytree can be found in the following cities: Wrocław, Łódź, Ostrołęka, and Łomża, whose planting of Oxytree trees in traffic routes was the subject of research in this study. After all, it should be remembered that these best hybrids of the Paulownia genus and their valuable properties have characteristics that allow them to increase urban areas' biodiversity while providing natural shelter for bees and other insects.

Aim, subject, material and methods

This study aimed to compare the biometric characteristics of Oxytree tree planting in traffic routes in the city of Łomża, in two growing seasons of 2019–2020. The degree of

adaptation and growth of this species tree in north-eastern Poland's urban conditions was studied. The growth rate of the trunk height and its diameter in two consecutive years of cultivation was determined.

The analysis covered aerobic trees (*Clon in Vitro 112*) planted in the city of Łomża (53°10'35 "N 22°04'23 "E) in the second half of May 2019 as part of a tripartite agreement signed on 16 April 2019 between Municipal Utilities and Housing Company Budgetary Facility in Łomża (Miejskie Przedsiębiorstwo Gospodarki Komunalnej i Mieszkaniowej Zakład budżetowy w Łomży), Institute for Plant Protection – National Research Institute in Białystok (Instytut Ochrony Roślin Państwowym Instytut Badawczy w Białymstoku) and Higher School of Agribusiness in Łomża (Wyższa Szkoła Agrobiznesu w Łomży), currently The International Academy of Applied Sciences in Łomża (Międzynarodowa Akademia Nauk Stosowanych w Łomży).

At the beginning of May 2019, soil samples were taken from the locations that had been mapped out for Oxytree planting and submitted to the District Agricultural and Chemical Station in Białystok for testing to determine macro- and micro-nutrient abundance. Then, at the planned locations, holes with a diameter of 30 cm and a depth of 100 cm were drilled using a combustion drill. In the holes prepared in this way - treated with horticultural soil mixed with granulated manure – 51 *Clon in Vitro 112* seedlings were planted by MPGKiM employees in Łomża on 22 and 23 May 2019. Shortly after planting, the trees were watered generously. Plastic netting protects the planting sites from possible mechanical damage during lawn mowing and from animals.

After the aerobic tree plantings were made, maintenance treatments were carried out, i.e., watering during the lack of precipitation, shaking the soil around the planted plants and removing competing vegetation within 40 cm around the trunk. In the first decade of August 2019, a single post-emergence fertilisation was applied, using YaraMila COMPLEX multi-nutrient fertiliser with the following composition:

total Nitrogen – 12% N (including: 5% N-NO₃ and 7% N-NH₄); Phosphorus – 11% P O₂₅; Potassium – 18% K₂ O; Magnesium – 2.7% MgO; Sulphur – 20% SO₃; Boron – 0.015% B; Iron – 0.20% Fe; Manganese – 0.02% Mn; Zinc – 0.02% Zn. YaraMila COMPLEX fertiliser was applied at 100 g under each Oxytree tree.

Trees were planted in five locations in urban green belts, in the following locations:

- Łomża, ul. Józefa Piłsudskiego plot no. 12097/2,
- Łomża, ul. Józefa Piłsudskiego plot no. 12065/3,
- Łomża, ul. Zawadzka plot no. 11272,
- Łomża, ul. Wojska Polskiego plot no. 30601
- Łomża, ul. Poznańska plot no. 30929/4.

After the first year of vegetation, good overwintering of Oxytree trees planted in urban green belts in Łomża was reported. On 14 May 2020, in accordance with the guidelines of the seedling distributor, one-year shoots were pruned at a height of 5-6 cm from ground level. The pruned stem sites were treated with Miedzian WP 50 (Cu 50%) to protect the plants against fungal diseases. On the same day, mineral fertilisation was also applied at 20 g per tree, within a 30–40 cm radius from the trunk – with Polifoska fertiliser with NPK composition 8 – 24 – 24 and 8% sulphur and mixed into the soil. In early July 2020 and the second decade of August 2020, mineral fertilisation with YaraMila COMPLEX multi-nutrient fertiliser was applied at 20 g around each tree. During the second growing season of *Clon in Vitro 112* trees in the traffic routes of the city of Łomża, the remaining cultivation treatments were analogous to those performed in 2019.

Compared to 2019, an innovation was that in April 2020, on plots 12097/2 and 12065/3 (Józef Piłsudski Street), flower meadows were created around the Oxytree trees as an alternative to lawns requiring frequent mowing.

Following the end of the growing seasons in both 2019 and 2020, i.e. on 21 October 2019 and 16 October 2020 respectively, biometric measurements were taken, consisting of: measuring the overall height of the trees, measuring the diameter of the plant stems at 20 cm above ground level.

The development of the oxytree trees was continuously monitored. Measurements of the trees' height and the trunk's thickness were taken at 20 cm. These were carried out using INOX Bucuresti STAS1373-55 0.05 mm callipers, a soft, flexible 150 cm FITYLE measuring tape, and a THEIS 500 cm/0.1 cm measuring strip.

In 2019, the growing period for the *Paulownia* hybrid seedlings was taken from the planting date until the first frost occurred. In 2020, on the other hand, the date that was considered the start of the growing period was

the day with an average temperature of 10 °C, while the end of the growing period was the day when temperatures below 0°C occurred.

According to the above algorithm, the growing season 2019 was 148 days; in 2020, it was less, at 139 days. Ad hoc observations and current temperature measurements were made using the DAVIES W-2020S meteorological station of the Łomża Housing Cooperative, located in the area of urban development at Konstytucji 3 Maja and Piłsudskiego Streets in the centre of the Południe Housing Estate (53° 9.76' N 022° 4.03' E)

The amount of precipitation and temperature for the study periods, i.e. 2019 and 2020, were obtained from the meteorological station of the Central Centre for Cultivar Testing of the Experimental Plant Variety Evaluation Department in Marianów (53° 12' 36" N 22° 06' 24" E).

Results

The soil profile on which Oxytree was planted was characterised by different contents depending on the location, while an alkaline soil reaction (pH>7.2) was recorded in all planting sites. For macronutrients, soil phosphorus, potassium and magnesium abundance were examined. As a result of the phosphorus abundance analysis, depending on the sampling location, its content took on medium, high or very high values. Indeed, it ranged from 11.1 to 22.9 g·kg⁻¹. Similarly, the abundance of potassium in the soil varied from very low to medium, i.e. from 8.3 to 14.5 g·kg⁻¹, while the content of magnesium ranged from low to medium (Table 1).

In the first months of growth of the Paulownia hybrid seedlings (Clon in Vitro 112)

planted in the traffic routes of the city of Łomża, the climatic conditions were not favourable for their development. In the month preceding the planting, i.e. April 2019, the sum of monthly precipitation was almost ten times lower than 30-year precipitation in the corresponding time interval.

In April, the average recorded temperature was 8.6 °C, close to the multi-year (1989–2018) average temperature of 8.2 °C. A lack of precipitation also accompanied the first two decades of May 2019. It was only at the end of the second and the beginning of the third decade that 116 mm of rain fell, but the torrential nature of the rainfall caused the water to run off the soil without penetrating satisfactorily into the soil profile—nevertheless, the rains in May 2019 slightly improved soil moisture conditions. The average monthly temperature in May was 12.5 °C, 0.9 °C lower than the May temperatures recorded in the multi-year period. However, it is essential to note that the warmer end of the month and the rainfall occurring at that time significantly accelerated the growth of Oxytree seedlings during this period (Table 2).

June 2019 was one of the warmest months of the first growing season, *Clon in Vitro 112* in the municipal green areas of Łomża. The average daily temperature was 20.4 °C, 3.9 °C higher than the average of the past thirty years. The high temperatures were not accompanied by frequent rains, as the total recorded rainfall in June was 35.1 mm, less than 54% of the total rainfall simultaneously in the 1989 – 2018 multi-year period. The prominent growth of seedlings in August 2019 was undoubtedly favoured by the average daily temperature,

Table 1
 The pH of the soil and its abundance in digestible macronutrients

Soil sampling location	pH in KCl	Nutrient content [g·kg ⁻¹] ¹		
		Phosphorus	Potassium	Magnesium
Łomża, J. Piłsudskiego plot no. 12097/2	7,6	19,0	16,6	6,8
Łomża, J. Piłsudskiego plot no. 12065/3	7,9	11,1	7,1	3,6
Łomża, Zawadzka plot no. 11272	7,5	20,5	13,9	5,6
Łomża, Wojska Polskiego plot no. 30601	7,6	22,9	14,5	5,0
Łomża, Poznańska Plot no. 30929/4	7,9	18,5	8,3	3,5

¹Source: Own elaboration based on OSCHR report in Białystok.

Table 2

Average monthly temperature and monthly precipitation from April to October in the first and second growing seasons

Month	2019	2020	Multi-year average temperature 1989-2018, °C	2019	2020	Σ multi-year precipitation 1989-2018, mm
	Average temperature month, °C	Average temperature month, °C		Rainfall totals in month, mm	Rainfall totals in month, mm	
April	8,6	7,4	8,2	3,7	3,3	35,5
May	12,5	10,1	13,4	116,0	85,0	48,4
June	20,4	16,9	16,5	35,1	188,0	65,6
July	17,5	18,0	18,7	106,7	24,4	80,7
August	18,5	19,6	18,0	79,9	102,2	62,3
September	13,3	15,7	12,9	41,2	39,0	54,7
October	10,1	11,5	7,8	36,0	53,5	55,5
7-month average t ⁰	14,4	14,2	13,6			
Σ atmospheric precipitation				418,6	495,4	402,7

Source: own elaboration based on data from the Meteorological Station ZDOO Marianowo

18.5 °C for the month, and the significant rainfall (79.9 mm).

In 2020, being the second growing season of the oxytree, the warmest month was August, with an average temperature of 19.6 °C, and the coldest April, with an average temperature of 7.4 °C. The average temperature over the study period was 14.2 °C. It was 0.1 °C higher than the multi-year average temperature.

The average precipitation in the second growing season was 70.8 mm. The driest month was April, with a total of 3.3 mm, and the highest rainfall was in June, with 188 mm. Compared to the multi-year rainfall, the average was 30.2 mm less.

Due to the climatic conditions in which the Paulownia maples grew in the municipal green areas in Lomza, it must be acknowledged that both 2019 and 2020 were not the best years for tree development. A very dry April 2019 (the month preceding the planting of Oxytree trees), where only 3.7 mm of rainfall was recorded, and a similarly dry April 2020 (rainfall of 3.3 mm), which in turn was the month preceding the cutting of annual shoots, certainly did not have a positive effect on the growth rate of the seedlings. In doing so, it should be noted that both growing seasons analysed in the study were relatively short. For example, in 2019, the growing season (148 days) was 28 days shorter than the vegetation growing season in 2018, while in 2020, the

tree growing season was 139 days, 37 days shorter than two years earlier.

Despite not having the best climatic conditions, typical of north-eastern Poland, with late spring frosts accompanying the development of the trees, the growth of Paulownia hybrids on roadside green belts in Łomża was very satisfactory.

On 21 October 2019 and 16 October 2020, biometric measurements were taken of Oxytree trees planted in traffic routes in the city of Łomża, including the height and trunk diameter of Paulownia hybrids. The trunk circumference was calculated using formula 1, while formula 2 calculated the daily growth of the plants. The results of the measurements carried out on the individual plots are summarised in Table 3.

The scope of the analysis in 2019 included 51 aerobic trees (*Clon in Vitro 112*) planted in the city of Lomza in the second half of May 2019 in five locations, in traffic routes with heavy vehicle traffic. After the first vegetation period of the plants, which lasted 148 days, on the day the biometric traits of the plants were measured, no loss in their originally planted quantity was found. On the other hand, in 2020, at the time of the measurement activity, four plants were found to have been lost hence 47 *Clon in Vitro 112* trees were included in the analysis, with a second growing season lasting a shorter period of 139 days.

In 2019, the highest tree height was achieved on plot 12065/3, which was 208 cm.

Table 3

Measurement results of the biometric features of Oxytree trees in 2019–2020 on individual plots

Plot location	2019		2020	
	Oxytree height, cm	Trunk diameter, mm	Oxytree height, cm	Trunk diameter, mm
Trees on plot no. 12097/2	82,9	17	187,7	36
Trees on plot no. 12065/3	111,9	21	190,4	39
Trees on plot no. 11272	89,8	18	176,5	33
Trees on plot no. 20601	66,2	14	140,0	32
Trees on plot no. 20929/4	125,5	24	165,0	33
Average	95,3	19	171,9	35

The lowest tree only reached a height of 17 cm in 2019. On plot no. 12097/2

In 2020, during the second growing season, the tallest tree reached a height of 290 cm on plot 1265/3, and the lowest tree grew to 65 cm on plot no. 11272 (Fig. 1).

Summary

The scope of the analysis in 2019 included 51 aerobic trees (*Clon in Vitro 112*) planted in the city of Lomza in the second half of May 2019 in five locations, in traffic routes with heavy vehicle traffic. After the first vegetation

period of the plants, which lasted 148 days, on the day the biometric traits of the plants were measured, no loss in their originally planted quantity was found. On the other hand, in 2020, at the time of the measurement activity, four plants were found to have been lost hence 47 *Clon in Vitro 112* trees were included in the analysis, with the second growing period lasting a shorter period of 139 days.

In 2019, the lowest average height of Oxytree trees (66.29 cm) was recorded in plot



Fig. 1. Oxytree trees at plot 11272 on Zawadzka Street. Photo by the author

no. 30601, i.e. in the plot at Wojska Polskiego Street in Łomża, while the highest, i.e. 125.5 cm, was recorded at Poznańska Street (Fig. 2).

According to a study by Lisowski and Porwisiak (Lisowski & Porwisiak, 2017), soil and climatic conditions affect the development of Oxytrees. However, they can be grown even on poor soils in partially unfavourable climatic conditions. Regardless of the location of the experiments in Poland, Oxytree is characterised by significant growth rates.

The characteristic feature of oxytree trees is their large leaves. In hot weather, they provide plenty of shade and become a valuable fertiliser when they fall. According to Lisowski and Porwisiak (2018), oxytree leaves decompose quickly after falling, and there is no trace in spring. As fertilisers, they contain about 3% nitrogen, six times more than in manure, and above-average mineral nutrients. With which they can supply themselves with nutrients through self-fertilisation.

Very similar increases in oxytree tree height and stem thickness in the first two years of cultivation were obtained by Skibko and co-authors (Skibko et al., 2021).

Conclusions

Based on the experiment carried out over two growing seasons, the following conclusions can be drawn:

1. The oxytree trees in both the first and second year of vegetation confirmed the speed of growth. In the first year, the average height of 51 oxytree trees was 95.3 cm, and in the second year, it was 171.9 cm.

2. The average stem thickness of the 51 oxytree trees measured at 20 cm from the ground after the first growing year was 19 mm, and after the second year, it was 35 mm.

3. In 2019, the highest tree height was achieved on plot 12065/3, which was 208 cm. The lowest tree only reached a height of 17 cm in 2019. On plot no. 12097/2

4. In the second growing season of 139 days, the tallest tree reached a height of 290 cm on plot 1265/3, and the lowest tree grew to 65 cm on plot no. 11272.

5. The growth of oxytree trees was strongly influenced by climatic factors and the length of the growing season. The lack of rainfall during the respective growth phases and the high temperature in the first month after planting the oxytree seedlings affected the growth and development of the plants.

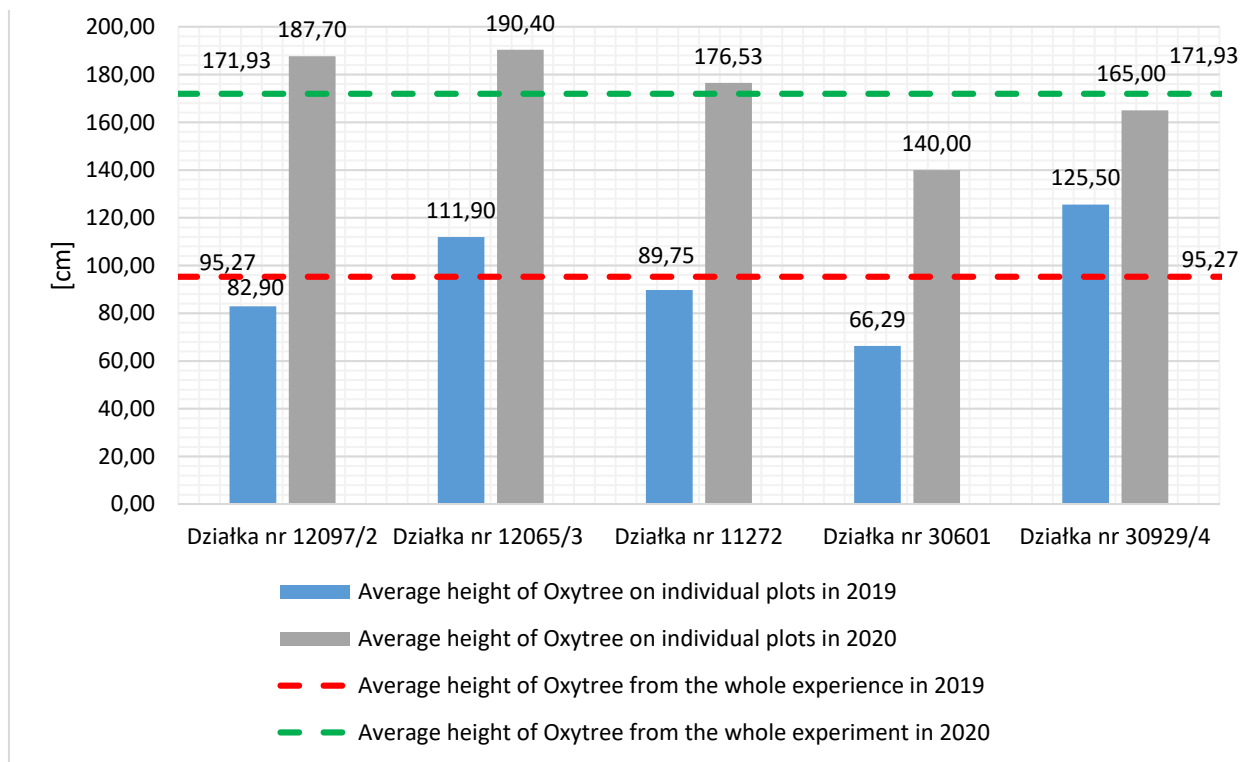


Fig. 2. Average height of Oxytree trees in 2019-2020 in individual plots, relative to average heights from the whole experiment (Source: own elaboration)

Список використаної літератури

- Bartnicka M., Ullman I. Making the most of greenery's assets. *Architecturae et Artibus*. 2009. № 2. P. 17–22.
- Borowski J. *Tree – structure and functioning*. K. Witkoś-Gnach, P. Tyszko-Chmielowiec (eds.), *Drzewa w krajobrazie. A practitioner's handbook*, EcoDevelopment Foundation. Wrocław, 2014. 145 p.
- Borusiewicz A., Lisowski J., Porwisiak H. Biometric traits and energy parameters of oxytree tree in the first three years of cultivation. *Paper presented at the Scientific Conference of the PTA Productive and ecological aspects of the management of agricultural production space*. Lublin – Kazimierz Dolny 11–13 September 2019. Lublin, 2019.
- Cavender-Bares J., Balvanera P., King E., Polasky S. Ecosystem service trade-offs across global contexts and scales. *Ecology and Society*. 2015. № 20 (1). 22 p.
- Garczyńska M., Mazur-Pączka A., Pączka G., Kostecka J. Applied botany, I. Tree and shrub protection in urban investment processes. *Ecological Engineering*. 2017. № 18. 3 p.
- Jakubowski M., Tomczak A., Jelonek T., Grzywiński W. Wood utilisation and cultivation potential of trees of the genus *Paulownia*. *Journal of Hymenoptera Research 67, Acta Sci. Pol. Silv. Colendar. Ratio Ind. Lignar*. 2018. № 17 (4). P. 291–297.
- Kronenberg J. Barriers to urban tree maintenance and ways to overcome these barriers. Sustainability - applications. Sendzimir Foundation. *Nature in the City*. 2012. № 3. P. 32–50.
- Lisowski J., Porwisiak H. Biometric traits of oxytree tree in the first year of vegetation, *Zeszyty Naukowe nr 67. WSA Łomża*. 2017. P. 56–64.
- Lisowski J., Porwisiak H. Oxytree - the tree of the 21st century, Green areas in air protection, Polish Association of Sanitary Engineers and Technicians, edited by Marek Kosmala. Toruń, 2018b. P. 159–170.
- Lisowski J., Porwisiak H. Biometric traits of Oxytree (*Paulownia Clon in vitro 112*) trees after the third and fourth year of cultivation. *Zeszyty Naukowe WSA*. 2020. № 77 (1/2020). P. 41–48.
- McPherson E.G. Monitoring Million Trees LA: Tree Performances during the Early Years and Future Benefits. *Arboriculture & Urban Forestry*. 2014. № 40 (8). P. 286–30.
- Mizgajski A. Landscape management as an aspect of environmental management. Landscape classification. Theory and practice. *Problemy Ekologii Krajobrazu*. 2008. № 20. P. 147–151.
- Skibko Z., Romaniuk W., Borusiewicz A., Porwisiak H., Lisowski J. Use of pellets from agricultural biogas plants in fertilisation of oxytrees in Podlasie, Poland. *Journal of water and land development*. 2021. №. 51 (10–12). P. 124–128.
- Szczypta P. Valuation of trees in public spaces and business units. *Economic Studies*. 2016. № 268. P. 196–205.
- Szczepanowska H.B., Sitarski M, Suchocka M, Sobczyński L., Pstrągowska M., Olizar J. Ocena funkcjonowania drzew i krzewów w warunkach oddziaływania infrastruktury technicznej miasta, IGPIM. Warszawa, 2012.
- Szczepanowska H.B., Sitarski M. Trees green capital of cities. How to increase the effectiveness of trees. Institute of Spatial Management and Housing. Warsaw, 2015.
- Wozniak M., Gałazka A., Frac M. *Paulownia*. A fast-growing, multifunctional bioenergetic tree. *Cosmos*. 2018. № 67 (4). P. 781–789.
- Wozny A. Influence of habitat conditions on the condition of street greenery. *Infrastructure and Ecology of Rural Areas*. 2015. P. 8–12.

References (translated & transliterated)

- Bartnicka, M., & Ullman, I. (2009). Making the most of greenery's assets. *Architecturae et Artibus*, 2, 17–22 [in English].
- Borowski, J. (2014). *Tree – structure and functioning*. K. Witkoś-Gnach, P. Tyszko-Chmielowiec (eds.), *Drzewa w krajobrazie. A practitioner's handbook*, EcoDevelopment Foundation. Wrocław [in English].
- Borusiewicz, A., Lisowski, J., & Porwisiak, H. (2019). Biometric traits and energy parameters of oxytree tree in the first three years of cultivation. *Paper presented at the Scientific Conference of the PTA Productive and ecological aspects of the management of agricultural production space*. Lublin – Kazimierz Dolny 11–13 September 2019. Lublin [in English].
- Cavender-Bares, J., Balvanera, P., King, E., & Polasky, S. (2015). Ecosystem service trade-offs across global contexts and scales. *Ecology and Society*, 20 (1), 22 [in English].

- Garczyńska, M., Mazur-Pączka, A., Pączka, G., & Kostecka, J. (2017). Applied botany, I. Tree and shrub protection in urban investment processes. *Ecological Engineering*, 18, 3 [in English].
- Jakubowski, M., Tomczak, A., Jelonek, T., & Grzywiński, W. (2018). Wood utilisation and cultivation potential of trees of the genus *Paulownia*. *Journal of Hymenoptera Research* 67, *Acta Sci. Pol. Silv. Colendar. Ratio Ind. Lignar*, 17 (4), 291–297 [in English].
- Kronenberg, J. (2012). Barriers to urban tree maintenance and ways to overcome these barriers. Sustainability - applications. Sendzimir Foundation. *Nature in the City*, 3, 32–50 [in English].
- Lisowski, J., & Porwisiak, H., (2017). Biometric traits of oxytree tree in the first year of vegetation, *Zeszyty Naukowe nr 67*, WSA Łomża, pp. 56–64 [in English].
- Lisowski, J., & Porwisiak, H., (2018b). Oxytree - the tree of the 21st century, Green areas in air protection, Polish Association of Sanitary Engineers and Technicians, edited by Marek Kosmala. Toruń, pp. 159–170 [in English].
- Lisowski, J., & Porwisiak, H. (2020). Biometric traits of Oxytree (*Paulownia Clon in vitro 112*) trees after the third and fourth year of cultivation. *Zeszyty Naukowe WSA*, 77 (1/2020), 41–48 [in English].
- McPherson, E.G. (2014). Monitoring Million Trees LA: Tree Performances during the Early Years and Future Benefits. *Arboriculture & Urban Forestry*, 40 (8), 286–30 [in English].
- Mizgajski, A. (2008). Landscape management as an aspect of environmental management. Landscape classification. Theory and practice. *Problemy Ekologii Krajobrazu*, 20, 147–151 [in English].
- Skibko, Z., Romaniuk, W., Borusiewicz, A., Porwisiak, H., & Lisowski, J. (2021). Use of pellets from agricultural biogas plants in fertilisation of oxytrees in Podlasie, Poland. *Journal of water and land development*, 51 (10–12), 124–128 [in English].
- Szczyba, P. (2016). Valuation of trees in public spaces and business units. *Economic Studies*, 268, 196–205 [in English].
- Szczepanowska, H.B., Sitarski, M., Suchocka, M., Sobczyński, L., Pstrągowska, M., & Olizar, J. (2012). Ocena funkcjonowania drzew i krzewów w warunkach oddziaływania infrastruktury technicznej miasta, IGPI. Warszawa [in Polish].
- Szczepanowska, H.B., & Sitarski, M. (2015). Trees green capital of cities. How to increase the effectiveness of trees. Institute of Spatial Management and Housing. Warsaw [in English].
- Wozniak, M., Gałazka, A., & Frac, M. (2018). *Paulownia*. A fast-growing, multifunctional bioenergetic tree. *Cosmos*, 67 (4), 781–789 [in English].
- Wozny, A. (2015). Influence of habitat conditions on the condition of street greenery. *Infrastructure and Ecology of Rural Areas*, 8–12 [in English].

Отримано: 30.04.2024
Прийнято: 08.05.2024



UDC 614.7(477):[502.22+504.61](043)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.23>

**ECOLOGICAL AND COMPARATIVE ANALYSIS OF THE INFLUENCE
OF THE WEATHER FACTOR UNDER THE SIMULTANEOUS ACTION
OF HELIOMAGNETIC STORMS (HMS) ON THE VEGETATIVE BALANCE
OF GIRLS OF DIFFERENT AGES**

O. V. Yermishev¹

The ecological role and biological nature of the mechanisms of their interaction remain unclear despite the extensive scientific data available on the impact of meteorological and heliogeophysical factors on the health and physiological parameters of the organism. It has been established that the body's response to various stressful influences is largely determined by the ratio of the tone of the sympathetic and parasympathetic divisions of the autonomic nervous system. It is the autonomic nervous system (ANS) and, above all, its sympathetic division that plays a special role in the formation of adaptive reactions of the body, the development of meteorological reactions, i.e. the autonomic nervous system is the primary site of meteorological influences that cause shifts in its balance. Determination of vegetative status and direction of vegetative activity in girls' organism was carried out by means of functional and vegetative diagnostics by V. Makats' method. We examined 186 girls, including 38 girls aged 7–11 years, 126 – aged 12–15 years and 22 – aged 16–21 years. Since the state of the autonomic nervous system is decisive in the development of meteorotropic reactions, the data of the study of vegetative tone in sunny and cloudy weather under the combined influence of heliomagnetic storms (HMS) were analysed, favourable and unfavourable weather conditions for the body were determined and the state of adaptive health of the examined children was determined. It was found that under the influence of heliometeorological factors on the organism of practically healthy young girls, age-related peculiarities of meteorological variability are observed.

It was found that the combined effect of the weather factor and geomagnetic storms (GMS) leads to changes in the functional activity and homeostasis of the body. The study of systemic age dependence revealed increased sensitivity to the weather factor with the simultaneous effect of GMS in the group of girls aged 16–21 years, which is associated with age-related physiological processes. It was also found that when the body was exposed to sunny weather under the influence of GMS, there was a significant parallel suppression of the sympathetic nervous system (SNS) (bladder (BL) pacemaker) and the parasympathetic nervous system (PNS) (spleen and pancreas (SP) pacemaker) in the groups of girls aged 12–13 and 16–21 years. The opposite reaction was found in the group of 16–21 years old under the simultaneous influence of cloudy weather and HMS. Normally, the ANS and PNS are functional antagonists, and when one is activated, the other is automatically inhibited. Only under the conditions of a super-powerful factor or several simultaneously acting on the body does a synchronous change in the activity of these autonomic nervous systems occur.

¹ Candidate of Biological Sciences, Docent, Associate Professor
at the Department of Biophysics and Physiology
(Vasyl' Stus Donetsk National University, Vinnytsia)
e-mail: o.yermishev@donnu.edu.ua;
ORCID: 0000-0001-5854-9678

In the analysis of changes in functional-adaptive health and adaptation coefficient under the influence of different weather under the influence of HMS, an unfavourable effect of sunny weather under the influence of HMS was revealed, characterised by an increase in the number of girls in the zone of PS activity with a simultaneous decrease in the FR zone, which indicates a negative aspect of the effect on the adaptation system and indicates the depletion of adaptive resources.

The effects of weather on the body, even with the combined effect of HMS, are easily compensated for, and a special role in this belongs to the autonomic nervous system, whose activity ensures an adequate response of the body to the effects of environmental factors. Knowledge about meteosensitivity and meteorological reactions is necessary for the development of both preventive and therapeutic measures aimed at increasing nonspecific resistance and adaptation mechanisms of the body, normalising the function of organs and systems as a basis for normal reactions to adverse environmental changes. Environmental factors, including meteorological factors, are directly related to human life and health. Each of the meteorological elements has its own biological significance. This raises the question of the impact of solar activity, weather, atmospheric conditions, and, above all, anthropogenic pollution and other environmental parameters on human health, which naturally requires a quantitative approach to risk assessment and the development of necessary management decisions.

Key words: *weather, adaptation, functional systems, autonomic nervous system.*

ЕКОЛОГО-ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ФАКТОРУ ПОГОДИ ЗА КОМБІНОВАНОГО ВПЛИВУ ГЕЛІО-МАГНІТНИХ БУРЬ (ГМБ) НА ВЕГЕТАТИВНИЙ БАЛАНС ДІВЧАТ РІЗНОГО ВІКУ

О. В. Єрмішев

Незважаючи на наявні обширні наукові дані про вплив метеорологічних та геліогеофізичних факторів на стан здоров'я та фізіологічні параметри організму, екологічна роль та біологічна сутність механізмів їх взаємодії залишається поки що неясною. Необхідність вибору комплексного підходу до вивчення системи «Космос-Земля-Людина» очевидна та обґрунтована, тому що в його основі лежить ідея використання сучасних технологій і каналів отримання та поширення інформації про вплив космічної погоди, мінливість стану атмосфери, електромагнітних та гравітаційних полів, антропогенних забруднень та інших параметрів навколишнього середовища, що потребує ефективного та швидкого вирішення. Встановлено, що реакція організму на різні стресові впливи значною мірою визначається співвідношенням тонусу симпатичного і парасимпатичного відділів вегетативної нервової системи. Саме вегетативній нервовій системі (ВНС) і, перш за все, її симпатичному відділу належить особлива роль у формуванні пристосувальних реакцій організму, розвитку метеотропних реакцій, тобто вегетативна нервова система є первинним місцем докладання метеорологічних впливів, що викликають зрушення в її рівновазі. Визначення вегетативного статусу та направленість вегетативної активності в організмі дівчат проводили за допомогою функціонально-вегетативної діагностики за методом В. Макаца. Нами було обстежено 186 дівчат, з яких 38 – дівчата віком 7–11 років, 126 – віком 12–15 років та 22 – віком 16–21 рік. Оскільки стан вегетативної нервової системи є визначальним в розвитку метеотропних реакцій проведено аналіз даних дослідження вегетативного тонусу у сонячну, та хмарну погоду за комбінованого впливу геліо-магнітних бурь (ГМБ), визначення сприятливих і несприятливих погодних умов для організму та визначення стану адаптаційного здоров'я обстежених дітей.

Було виявлено, що за впливу геліометеорологічних факторів на організм практично здорових молодих дівчат спостерігаються вікові особливості проявів метеолабільності.

Було виявлено, що комбінований вплив фактору погоди та геомагнітних бурь (ГМБ) призводить до змін функціональної активності і гомеостазу організму. При дослідженні системно-вікової залежності була виявлена підвищена чутливість до фактора погоди з одночасною дією ГМБ в групі дівчат 16–21 року, що пов'язано з віковими особливостями фізіологічних процесів. Також було з'ясовано, що за впливу на організм сонячної погоди за дії ГМБ спостерігалось значне паралельне пригнічення симпатичної нервової системи (СНС) (нейсмейкер сечовий міхур (BL) та парасимпатичної нервової системи (ПНС) (нейсмейкер селезінка і підшлункова залоза (SP) в групах дівчат 12–13 та 16–21 років. Протилежну реакцію було виявлено в групі 16–21 років за одночасного впливу хмарної погоди і ГМБ. В нормі СНС та ПНС є функціональними антагоністами і при активації однієї автоматично відбувається пригнічення іншої. Тільки за умов дії надпотужного чинника чи декількох одночасно на організм відбувається синхронна зміна активності цих вегетативних НС. При аналізі змін функціонально-адаптивного здоров'я та адаптаційного коефіцієнту за впливу різної погоди за дії ГМБ було виявлено несприятливий вплив на їх формування сонячної погоди за дії ГМБ, що характеризується підвищенням кількості дівчат в зоні ПС активності

з одночасним зменшенням в зоні ФР, що свідчить про негативний аспект дії на систему адаптації та свідчить про виснаження адаптаційних ресурсів. В здоровому організмі зміни фізіологічних процесів і функціональної активності систем під впливом такого фактору, як зміна погоди, навіть за комбінованого впливу ГМБ легко компенсуються і особлива роль в цьому належить вегетативній нервовій системі, діяльність якої забезпечує адекватну реакцію організму на вплив факторів зовнішнього середовища. Знання про метеочутливість і метеопатичні реакції необхідні для розробки як профілактичних, так і лікувальних заходів, спрямованих на підвищення неспецифічної резистентності та адаптаційних механізмів організму, на нормалізацію функції органів і систем як основу для нормальних реакцій при несприятливих змінах зовнішнього середовища. Чинники довкілля, зокрема і метеорологічні, мають безпосереднє відношення до забезпечення життєдіяльності та здоров'я людей. Кожен із метеорологічних елементів має своє біологічне значення. В цьому випадку виникає питання про вплив сонячної активності, погоди, стан атмосфери, і, насамперед, антропогенних забруднень та інших параметрів середовища на здоров'я людей, що, природно, вимагає кількісного підходу до оцінки ризиків та вироблення необхідних управлінських рішень.

Ключові слова: погода, адаптація, функціональні системи, вегетативна нервова систем.

Introduction

The ecological role and biological nature of their interaction mechanisms remain unclear despite the extensive scientific data available on the impact of meteorological and heliogeophysical factors on health and physiological parameters of the organism (Єрмішев та ін., 2017; Berrang-Ford et al., 2021; Campbell-Lendrum et al., 2023). The need to choose an integrated approach to the study of the Space-Earth-Human system is obvious and justified, since it is based on the idea of using modern technologies and channels for obtaining and disseminating information about the impact of space weather, variability of the atmosphere, electromagnetic and gravitational fields, anthropogenic pollution and other environmental parameters, which requires effective and rapid solution (Davis et al., 2018; Lenton et al., 2023).

Heliophysical factors influence the course of important and widespread physical and chemical processes in the biosphere, they affect many aspects of biological phenomena, which is reflected in the corresponding changes in the vital activity of most living organisms. Cosmic radiation of the hard range of the electromagnetic spectrum and high-energy particles have had a powerful impact on the biosphere in the past, often changing the course of evolution of living organisms. The main external, abiotic factors of the Earth's biosphere stability are undoubtedly solar radiation, the Earth's own magnetic field and oxygen in the atmosphere. The Sun is the main supplier of energy to our planet, and it drives most of the processes in the ecosphere. Solar energy is of the utmost importance for the Earth's biosphere as it drives the movement of the atmosphere and ocean currents and supports all life processes.

Changes in solar radiation are responsible for climate cycles (Davis et al., 2018).

The role of cosmogeophysical factors in the evolutionary adaptation of living systems is very diverse. Cosmogeophysical factors act as a weak training factor for adaptation-resistant members of the population; serve as a channel for rejecting non-viable members of the population; ensure synchronisation of individual times of biological objects in interaction with each other; are a synchroniser of the general rhythms of the population; create conditions for the generation of new information in the process of evolutionary adaptation of biosystems in general (Макац та ін., 2017; Davis et al., 2018).

It is known that active processes on the Sun cause an increase in solar wind flows and coronal mass ejections, which lead to the development of magnetic storms in the Earth's magnetosphere, one of the main elements of space weather. There are indirect signs of the impact of variations in solar and geomagnetic activity on weather and climate (Davis et al., 2018). Heliogeophysical factors and human heliometeorological reactions significantly affect the health potential both at the individual and population levels and largely determine the balance of 'human consumption' and 'human production' – a generalised indicator of population well-being (Єрмішев та ін., 2017; Chmura et al., 2018; Davis et al., 2018). This task is even more urgent in relation to the so-called environmental health, i.e. the health of the population dependent on the state of the environment, so the problem of establishing cause-and-effect relationships between the state (quality) of the environment and public health is one of the leading environmental and socially significant tasks (Єрмішев

та ін., 2017; Furdychko et al., 2020; Abbasi et al., 2023). Environmental factors, including meteorological factors, are directly related to the life and health of people. Each of the meteorological elements has its own biological significance. This raises the question of the impact of solar activity, weather, atmospheric conditions, and, above all, anthropogenic pollution and other environmental parameters on human health, which naturally requires a quantitative approach to risk assessment and the development of necessary management decisions (Henderson et al., 2018; Furdychko et al., 2020).

The aim of the study. To carry out an ecological and comparative analysis of the influence of meteorological factors under the combined action of HMS on the tone of the autonomic nervous system and the functional state of the body of PSA and ASA boys and to assess their impact on the human body.

Analysis of recent research and publications. The impact of the weather on the human body is multifaceted and not yet fully understood, but unfortunately, almost 70% of people today react to weather changes. It is known that meteorology, which is also considered a syndrome or a new disease, affects our psychological and physiological health. Meteorosensitivity is already appearing even in healthy people.

It is now recognised that solar activity (SA) affects a wide variety of processes in the biosphere, including the state of the human body (Davis et al., 2018). The main transmission link between solar flare activity and the state of living systems is the geomagnetic field (GMF) variations, the amplitude of which can increase by several orders of magnitude during 'solar storms' at high latitudes (Davis et al., 2018). This phenomenon results in a maladaptation syndrome in the human body, especially in meteorologically dependent people. The mechanism of development of meteorological reactions disrupts the stability of cell membranes, thereby affecting metabolic processes, energy balance, activation of lipid peroxidation, changes in quantitative indicators of blood cell structures, leading to exacerbation of chronic diseases, in particular the most vulnerable cardiovascular system. The tension arising in its operation can provoke the development of many pathologies (Lüthi et al., 2023). It is the sharp fluctuations in the HMS that are one of the reasons for the deterioration of the health of certain groups of people and the increased risk of death (Davis et al., 2018; Lüthi et al., 2023).

It has been proven that high SA and geophysical activity during intrauterine development and at birth reduces life expectancy by 8.4 years and increases the risk of mortality from cardiovascular diseases, in fact 'programming' the degree of vulnerability of the cardiovascular system, which is especially true for men (Zareba et al., 2021). As a rule, high SA is accompanied by HMS, which are predictors of disorders in the child's heart: disturbances in the synchronisation of daily fluctuations in the contractile force of the ventricles of the heart, a drop in the absolute values of the contractile force of the heart and blood pressure, and changes in the ultrastructure of heart cells (Zareba et al., 2021). These changes are likely to be 'remembered' (heliogeophysical imprinting) and create prerequisites for high sensitivity of the cardiovascular system not only to heliogeophysical effects, but also to other traumatic agents, which can lead to a decrease in life expectancy as a result of premature 'wear and tear' of the cardiovascular system. That is why the main target of the human body, which is affected by helio-geomagnetic activity, may be the heart and cardiovascular system in a state of pathology. The data obtained in the studies indicate that geomagnetic storms cause desynchronisation of cardiac biorhythms. Changes in the chronostucture of biorhythms are an indicator of the functional state of the body, one of the most important criteria for human physiological adaptation.

At the same time, patients with meteoropathy often have elevated levels of adrenocorticotrophic hormone (ACTH) and catecholamines (epinephrine and norepinephrine), which are stress hormones that are a humoral factor that stimulates the body's sympathetic activity, with symptoms such as palpitations, anxiety and irritability (Vicedo-Cabrera et al., 2021). For example, in healthy people, norepinephrine levels significantly increase 2 days before a magnetic storm, remain elevated during the storm, and increase again during the storm recovery phase (2 days after the storm). Adrenaline levels behave similarly. Conversely, endorphins, known as 'happy hormones', decrease, lowering the pain threshold (dopamine concentration decreases 2 days before and during the storm, and more than doubles 2 days after the storm). Another hypothesis suggests that the vagus nerve plays a role in meteorology, and its stimulation reduces weather-related symptoms in humans (Vicedo-Cabrera et al., 2021).

During periods of heliogeophysical disturbances, the haemorheological characteristics of the body tend to increase. Under the influence of the GMS, the average value of erythrocyte aggregation in humans is 1.6 times higher than on calm days, and platelet aggregation activity increases 1.4 times. An increase in the amount of catecholamines, blood viscosity, and the tendency to haemostasis forms internal factors of exacerbations of cardiovascular and circulatory system pathologies and increases the risk of mortality.

The combination of the following meteorological parameters: low average temperature and low sunshine, high humidity and high wind speed, all of these increase the risk of stroke in winter (Romanello et al., 2023).

Most often, the adverse effect of meteorological factors on the course of hypertension was detected in January, February and March against the background of low atmospheric pressure. In the winter-spring period, patients with hypertension with manifestations of meteorological variability showed an increase in sympathetic and mixed activity according to cardiac rhythmogram data (Morrison et al., 2022).

In addition to affecting human health, weather also has a significant impact on physical daily activity, which is one of the main factors in health. Thus, a meta-analysis showed that higher temperatures were associated with an increase and intensity of physical activity, while lower temperatures and heavy precipitation were associated with a decrease (Rahman et al., 2019; Zheng et al., 2021).

The study of the influence of helio- and meteorological conditions on the state of autonomic regulation of heart rate revealed a shift in the ratio of sympathetic and parasympathetic activity which has multidirectional changes and can be characterised by both relative sympathicotonia and relative parasympathicotonia. It is this multidirectionality of changes in the state of the autonomic nervous system in unstable weather conditions that is a specific pacemaker and can provoke exacerbation of most diseases of the cardiovascular system (Єрмішев та ін., 2017; Єрмішев, 2020; Berrang-Ford et al., 2021).

According to the literature review, the autonomic nervous system (ANS) is one of the main participants in the process of adaptation to any impact (Jänig, 2008; Єрмішев та ін., 2017; Єрмішев, 2020). Disruption of the autonomic regulation of the body inevitably occurs in cases of climatic maladaptation against the

background of heliogeophysical factors. These changes are especially pronounced in people with a history of vegetative-vascular disorders. There are several points of view in the scientific literature on the impact of meteorological factors on the human body. Often, researchers believe that the human body is affected by the sum of all meteorological factors, while in other cases, one leading factor is singled out from the complex of meteorological factors which determines the entire complex of changes in the human body (Gosling et al., 2017).

Considering a person as an open energy information system that is in continuous interaction with the external environment, it seems most relevant to study the impact of a set of meteorological and climatic factors on a person.

Material and methods

Using functional and vegetative diagnostics (FVD) according to the method of V. Makats, we examined 186 girls, including 38 primary school age (PSA) 7–11 years old, 126 adolescent school age 12–15 years old and 22 girls of youthful school age 16–21 years old, who underwent sanatorium rehabilitation in sanatoriums of Ukraine. The FVD was performed twice in the morning (10:00–11:00). We studied the bioelectrical activity of 12 symmetrical pairs of functionally active skin zones (24 FAZ), 12 on the arms and 12 on the legs, which reflect the functional activity of the sympathetic and parasympathetic nervous system (Єрмішев та ін., 2017; Єрмішев, 2020). FVD according to the method of V. Makats and devices for its implementation are officially authorized by the Ministry of Health of Ukraine “New Medical Equipment and New Diagnostic Methods” (№ 5 of 25.12.91; № 1.08-01 of 11.01.94) and the Academic Council of the Ministry of Health of Ukraine (№ 1.08-01 of 11.01.94) (Єрмішев та ін., 2017; Єрмішев, 2020).

VITA 01 M device is used for PVD, the voltage in the closed circuit of which does not exceed the levels of membrane potentials (1–5 μ A; 0.03–0.6 V) and which does not require external energy sources for its operation. It has 2 diagnostic electrodes, a base electrode (electron acceptor) - a convex plate made of a special alloy, pre-coated with an oxide film (5x7 cm) and a paired diagnostic electrode (electron donor) in the form of a silvered pair, which are located in ebonite cups with a diameter of 1 cm and wrapped in foam pads. The base electrode is fixed with a special belt through a wet pad (moistened

with saline) in the umbilical region (central mesogastric area (0-zone) with medium density tension to create stable examination conditions. Diagnostic electrodes are also moistened with saline. The procedure is performed in an orthostatic position. During testing, diagnostic electrodes at right angles with low pressure (at the level of touch), simultaneously contact each pair of symmetrical phases (left-right on each limb) for 1–4 seconds until stable readings in microamperes are obtained. After every 3 contacts with the FAZ, the electrodes are rewetted with saline. The data obtained in μA are converted to relative values. The obtained data are compared with the norm and a conclusion is made about the degree of deviation from it and the level of functional health disorder (Єрмішев О. В. та ін., 2017; Єрмішев, 2020). Changes in the physiological state of the body are manifested by the transformation of electrocutaneous resistance in certain functionally active zones (FAZ) of the skin, which topographically coincide with the course of 12 classical acupuncture meridians (functional systems) – lungs (LU), pericardium (PC), heart (HT), spleen and pancreas (SP), liver (LR) and kidneys (KI), which form the parasympathetic orientation of the ANS. The sympathetic orientation of the ANS is formed by the small intestine (SI), the state of the lymphatic system (TE), the large intestine (LI), the bladder (BL), the gallbladder (GB) and the stomach (ST). For diagnostics, correlations between changes in electrical conductivity in 24 representative FAZ (characterizing the state of the meridian as a whole) and the state of classical acupuncture meridians, “determining” the functional state of their corresponding internal organs and body systems, are used (Єрмішев та ін., 2017; Єрмішев, 2020). The relative ratio of the sum of the indicators of total sympathetic activity to parasympathetic activity determines the direction of the autonomic balance. The numerical result of this ratio is the adaptation-vegetative coefficient kAV (autonomic nervous system coefficient). For functional and ecological assessment of the impact of environmental factors, vegetative dispersion (scattering) is used in 3 critical zones: parasympathetic activity (PA) kAV – ≤ 0.86 ; functional-vegetative balance (FVB) kAV – $0.87 - 1.13$; sympathetic activity (SA) kAV – ≥ 1.14 , which are markers of functional health (adaptive potential) (Єрмішев та ін., 2017; Єрмішев, 2020). The mathematical and statistical analysis of the empirical results of the

observations was carried out in the Statistica 12 package. To test for the normality of the distribution of the results of the sample observations, the Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk criteria were applied, according to which there are no grounds to reject the hypothesis of a normal distribution of samples. This indicates that it is possible to use Student's t-test for independent variables to test the reliability of the difference in the results ($p > 0.2$ by Kolmogorov-Smirnov test and $p > 0.05$ by Shapiro-Wilk and Lillifors test). The hypotheses about the normal distribution of the samples are also confirmed by the histograms of the distribution. The application of Student's t-test for independent variables to test the reliability of the difference in the results obtained showed that the samples have standard deviations that do not differ statistically ($p\text{-Variances} \geq 0.05$) and mean values that also do not differ statistically from normal values ($p \geq 0.05$) at the significance level of $\alpha = 0.05$.

Results and discussion

Numerous effects of the space environment on the biosphere are most clearly manifested during magnetic storms (Davis et al., 2018). In the mid-90s of the last century, a hypothesis was put forward that:

1) heliogeomagnetic rhythms, together with illumination and temperature, are the basis for the formation of the circadian (daily) endogenous biorhythm.

2) heliogeomagnetic perturbations – “failures” of heliogeomagnetic rhythms – cause an adaptive stress response in biological objects, especially in a state of instability.

As a result of many years of research, it has been found that the characteristic targets of geomagnetic and meteorological influences are the circulatory system; cardiovascular system; autonomic nervous system and lungs. Therefore, the “risk groups” for geomagnetic and meteorological influences are the population with cardiovascular pathology, especially those who have had myocardial infarction; healthy people with functional overstrain of the adaptive system; children in the period of rapid development with an unformed adaptive system and the adult population with numerous endogenous causes of maladaptation of the body (Myhre et al., 2019; Ripple et al., 2022).

Monitoring of young children has shown the presence of all “solar” periods in their spectra, with newborn infants beginning to detect the circadian rhythm (the most powerful in the

mother's body) at 5–10 months of age, while in the first month they are dominated by the 7-day rhythm. When monitoring an infant for 26 months, the spectra of its vital signs show the presence of all period's characteristic of the period of the Sun's own rotation, about 28 days, and its harmonics. The period of 1 day begins to appear only at the 5th month of monitoring (Hoxha et al., 2023).

Failures of the external synchronizer rhythms – geomagnetic storms – lead to adaptive stress such as the reaction in case of failures of the circadian rhythm phase (stabilization of the heart rate, increased blood viscosity, and a drop in the contractile force of the heart) and to meteorotropic reactions characterized by changes in vascular tone (Hoxha et al., 2023). However, space weather is not the only biotropic factor affecting human health and well-being. Usually, its influence occurs in conjunction with the influence of terrestrial weather factors, and the impact of atmospheric pressure surges P, temperature T and geomagnetic activity surges (K-index) is distributed as follows: T: K: $\Delta P = 5:4:7$ (Davis et al., 2018).

According to the literature review, the autonomic nervous system (ANS) is one of the main participants in the process of adaptation to any impact (Макац та ін., 2017; Єрмішев та ін., 2017; Єрмішев, 2020). Disorders of the autonomic regulation of the body inevitably occur

in cases of climatic maladaptation against the background of heliogeophysical factors. These changes are especially pronounced in people with a history of vegetative-vascular disorders. The scientific literature today contains several points of view on the impact of meteorological factors on the human body. Often, researchers believe that the human body is affected by the sum of all meteorological factors, while in other cases, one leading factor is distinguished from the complex of meteorological factors, which determines the whole complex of changes in the human body (Hoxha et al., 2023). Considering a person as an open energy and information system that is in continuous interaction with the environment, it seems most relevant to study the impact of a complex of meteorological factors on a person.

In the study of systemic-age dependence in the female group (FG) of PSA aged 7–11 years, it was found that the combined effect of the weather factor and geomagnetic storms (GMS) leads to changes in functional activity and homeostasis of the body (Fig. 1). It can be clearly seen that the indicators of activity of functional systems (FS) under the influence of weather and geomagnetic storms duplicate the line of normality, differ in amplitude and have the same direction. Moreover, the presence of significant changes in the studied parameters of the FS activity indicators with the normal line indicates that different weather under the influence of HMS was

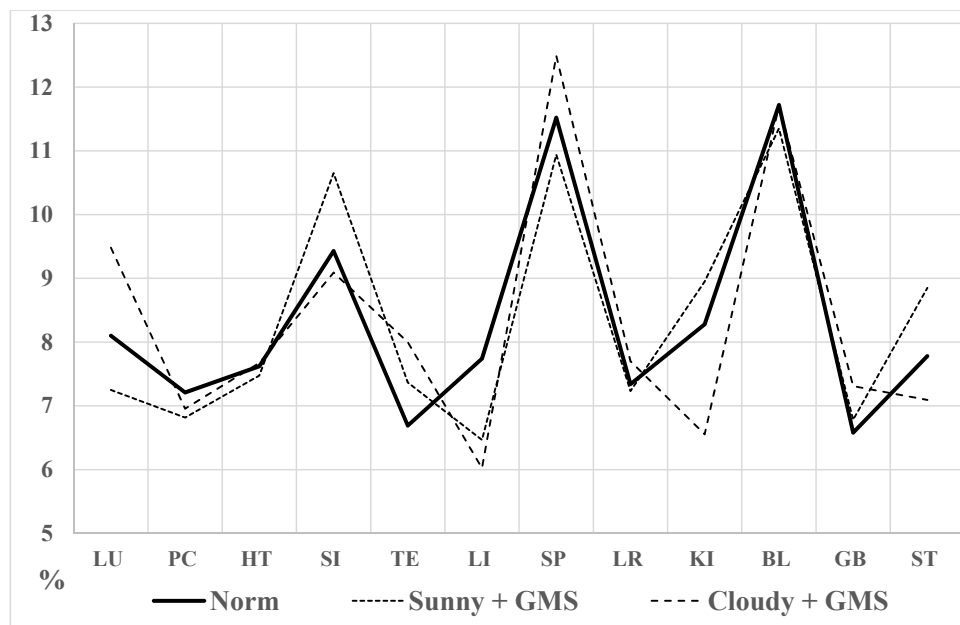


Fig. 1. Systemic-age dependence in the female group of primary school age (PSA) 7–11 years old in different weather conditions with simultaneous exposure to GMS, $p \leq 0.05$

characterised by the specificity of the effect on the body. In sunny weather, under the influence of HMS, there is an overstrain of the body's adaptation systems. Sunny weather under the influence of HMS stimulates the activity of the small intestine (SI), lymphatic system (TE) and stomach (ST). A decrease occurs in the FS of the lungs (LU), pericardium (PC), heart (HT) and large intestine (LI).

In cloudy weather under the influence of GMS, the systemic-age dependence in the LH of PSA was characterised by an increase in the activity of the FS of the lungs (LU), lymphatic system (TE), spleen and pancreas (SP) and gallbladder (GB). It inhibits the activity of the large intestine (LI), kidneys (KI) and stomach (ST).

The organism of children aged 7–11 years is characterised by physiological and functional immaturity of adaptation processes and the speed of their formation and stabilisation (Єрмішев, 2020). The rapid pace of morphological and functional development of all organs and systems, immaturity of the immune system during this period contribute to increased sensitivity of the children's body to changes in environmental factors, both environmental and physiological, as well as pathological ones.

Adolescence is a transitional stage from childhood development to the adult stage of ontogenesis. The transitional process of adolescence involves absolutely all levels of the adolescent's biological organisation, from

changes in the structure of the skeleton, respiratory system, blood circulation to the reproductive system, its functional and structural support. The pituitary gland becomes more active, physical and physiological development intensifies, and the motor system and neurohumoral relations are restructured. In adolescence, children experience sharp fluctuations in hormonal status, as well as active growth. Therefore, their meteorological sensitivity can be pronounced (Fig. 2).

In the study of systemic-age dependence in the FS of adolescent school age (ASA) of 12–16 years, it was found that weather changes under the influence of HMS lead to changes in functional activity and homeostasis of the body (Fig. 2). It was found that the obtained indicators of FS activity duplicate the normal line, differ in amplitude and have the same general direction. Thus, under the influence of sunny weather on the female body under the action of HMS, an increase in the studied parameters of the FS activity indicators relative to the age norm was found in the lungs (LU), pericardium (PC), heart (HT), small intestine (SI) and lymphatic system (TE). The activity of the FS of the large intestine (LI), liver (LR), kidneys (KI) and gallbladder (GB) was characterised by a decrease. There is also a parallel suppression of the sympathetic nervous system (bladder (BL) pacemaker) and the parasympathetic nervous system (spleen and pancreas (SP) pacemaker) (Fig. 2).

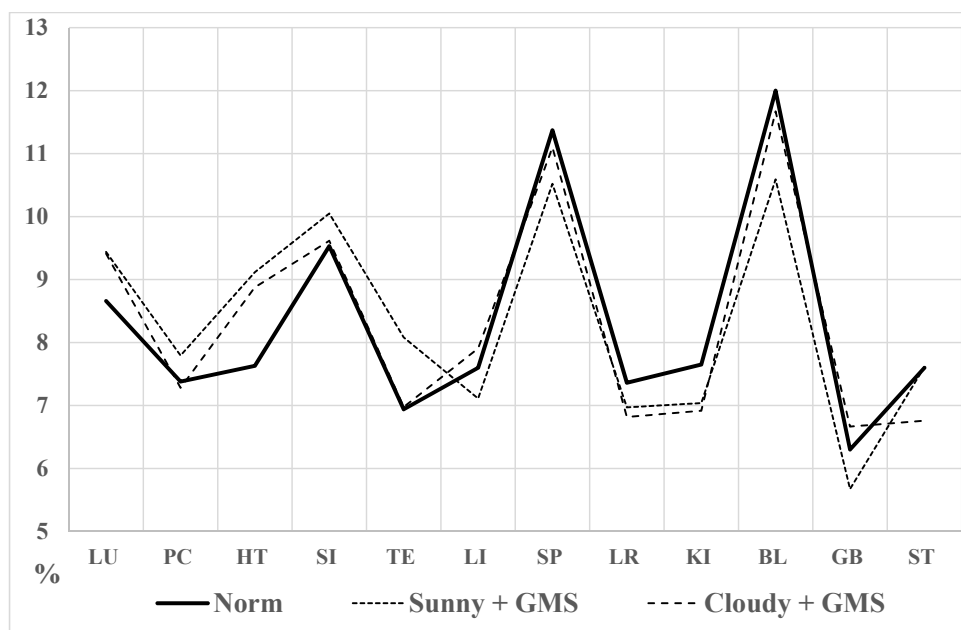


Fig. 2. Systemic-age dependence in the female group of adolescent school age (ASA) 12–15 years old in different weather conditions with simultaneous exposure to GMS, $p \leq 0.05$

In the FG of the PSH, cloudy weather under the influence of HMS caused an increase in the studied parameters of the parameters of the activity of the FS relative to the age norm in the lungs (LU) and heart (HT). A decrease in FS activity was recorded for the FS of the liver (LR), kidneys (KI) and stomach (ST) (Fig. 2).

In the study of systemic-age dependence in the group of young schoolchildren (YS) aged 16–21 years, it was found that weather changes under the influence of HMS lead to changes in functional activity and homeostasis of the body (Fig. 3). It was found that the obtained indicators of FS activity duplicate the normal line, differ in amplitude and have the same general direction and high variability of the obtained systemic results.

Thus, under the influence of sunny weather on the female organism of YSA under the action of HMS, an increase in the studied parameters of the indicators of FS activity relative to the age norm was found in the lungs (LU), pericardium (PC), heart (HT) and small intestine (SI). A decrease was observed in the FS activity of the lymphatic system (TE), large intestine (LI), liver (LR), kidneys (KI) and gallbladder (GB) and stomach (ST). There is also a parallel suppression of the sympathetic nervous system (bladder (BL) pacemaker) and the parasympathetic nervous system (spleen and pancreas (SP) pacemaker) (Fig. 3).

In FG YSA, cloudy weather under the influence of HMS caused an increase in the studied parameters of FS activity indicators relative to the age norm in the lungs (LU) and small intestine (SI). Cloudy weather under the influence of HMS stimulates the activity of the sympathetic nervous system (bladder (BL) pacemaker) and the parasympathetic nervous system (spleen and pancreas (SP) pacemaker). A decrease in FS activity was recorded for the FS of the pericardium (PS), liver (LR), kidneys (KI), gallbladder (GB) and stomach (ST) (Fig. 3).

It has been shown that under the influence of HMS there is an overstrain of the body's adaptation systems in sunny weather, which are characterised by the simultaneous suppression of the sympathetic nervous system (bladder (BL) pacemaker) and the parasympathetic nervous system (spleen and pancreas (SP) pacemaker), which was found in the FG of the ASA and the YSA. Normally, the sympathetic nervous system (SNS) and the parasympathetic nervous system (PNS) are functional antagonists and when one is activated the other is automatically inhibited. Only under the conditions of a super-powerful factor or several simultaneously acting on the body does the activity of these autonomic nervous systems change synchronously.

To more accurately determine the deviations of the numerical indicators of the activity of the body's FS in different seasons of the year,

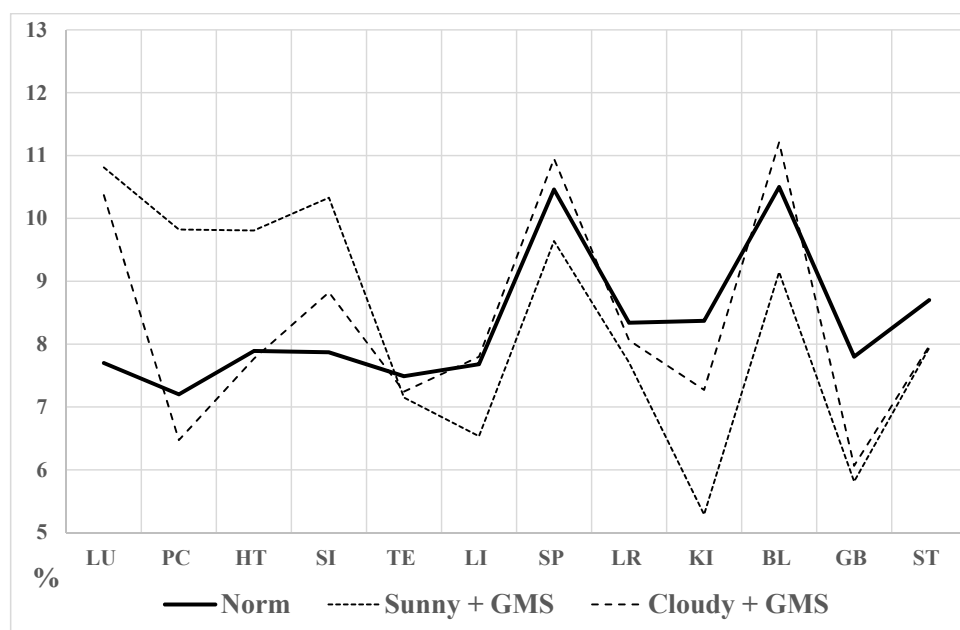


Fig. 3. Systemic-age dependence in the female group of young school age (YSA) 16–21 years old in different weather conditions with simultaneous exposure to GMS, $p \leq 0.05$

Table 1

Deviation of FVD values from the norm $\pm 10\%$ in FG groups of different ages

FS	Norm $\pm 10\%$			Weather					
				Sunny + GMS			Cloudy + GMS		
	PSA	ASA	YSA	PSA	ASA	YSA	PSA	ASA	YSA
LU	7,29-8,91	7,79-9,53	6,93-8,47	↓	=	↑	↑	=	↑
PC	6,49-7,93	6,94-8,45	6,48-7,92	=	=	↑	=	=	=
HT	6,86-8,38	6,87-8,39	7,10-8,68	=	↑	↑	=	↑	=
SI	8,49-10,37	8,58-10,48	7,09-8,66	↑	=	↑	=	=	↑
TE	6,02-7,36	6,25-7,63	6,74-8,24	=	↑	=	↑	=	=
LI	6,97-8,51	6,84-8,36	6,91-8,45	↓	=	↓	↓	=	=
SP	10,3-12,67	10,2-12,74	9,41-11,51	=	=	=	=	=	=
LR	6,61-8,07	6,62-8,09	7,51-9,17	=	=	=	=	=	=
KI	7,45-9,11	6,89-8,41	7,54-9,20	=	=	↓	↓	=	↓
BL	10,5-12,89	10,8-13,20	9,45-11,55	=	↓	↓	=	=	=
GB	5,92-7,24	5,67-6,93	7,02-8,87	=	=	↓	↑	=	↓
ST	7,01-8,86	6,84-8,36	7,83-9,57	=	=	=	=	↓	=

we compared them with the numerical value of the norm (mV) for each FS with a deviation of $\pm 10\%$. We determined the values that go beyond this physiological corridor in the direction of increase or decrease, marking them with the signs '↑' and '↓', respectively. Table 1 shows the results of deviations of FVD values from the norm $\pm 10\%$ in the FG groups of PSA, ASA and YSA.

The analysis of the results of deviations of FVD values from the norm $\pm 10\%$ in the PSA group revealed 8 deviations from the physiological corridor of the norm, among which 3 occurred in sunny weather during the HMS exposure and 5 in cloudy weather during the HMS exposure. Analysis of the results of deviations of FVD values from the norm $\pm 10\%$ in the PSA group revealed only 5 deviations from the physiological corridor of the norm, among which 3 occurred in sunny weather during the HMS 2 and cloudy weather during the HMS. Analysis of the results of deviations of FVD values from the norm $\pm 10\%$ in the YSA group revealed only 12 deviations from the physiological corridor of the norm, of which 8 occurred in sunny weather during the HMS and 4 in cloudy weather during the HMS.

The obtained array of data on the state of functional health of the population of a certain territory and the averaged information on the autonomic nervous system deviations can be used to analyse the impact on humans of both abiotic factors and possible environmental problems of the territory and its degree of environmental disturbance. As a result of the research, it was found that the main characteristic reflecting

the negative impact of environmental and internal factors is a decrease in the number of people surveyed in the zone of functional balance and an increase in the zone of parasympathetic activity. According to the criteria developed by us, the functional health of people is in the zone of conditional normality, when 50–70% of the population is in the zone of functional balance (FB) and 15–20% in the zones of sympathetic activity (SA) and parasympathetic activity (PA).

When analysing the impact of different weather under the influence of HMS on the functional and adaptive health of female groups of the Ukrainian population of different ages in comparison with the age norm, results were obtained that indicate age-related differences in the reactivity of the surveyed population. Sunny weather under the influence of HMS has the most unfavourable effect on the formation of adaptive health of the majority of the surveyed groups. The combination of these impacts increases the number of people in the PA zone and decreases in the FB zone, which indicates a negative aspect of the impact on the adaptation system and indicates the depletion of adaptation resources. With the ideal value of 15–20% of the population of compact residence being in the PA zone, we found a significant increase in this indicator, especially in the age group of the ASA population, which is 40.8%, with a simultaneous decrease in the FB zone to 44.9%. At the same time, the group of PSA girls was affected by the sunny weather under the GMS in the opposite way, increasing the number of examined children in the SA zone

to 40.0% with a simultaneous decrease in the FB zone.

In the analysis of the adaptive (functional) health of FG of the PSA and ASA groups under the combined effect of cloudy weather under the influence of the GBS, it was found that these age groups are quite adaptive to the above environmental factors. At the same time, the combined effect of cloudy weather under the influence of HMS on the age group of YSA leads to an increase in the number of people examined in the PA zone to 31.8% with a simultaneous decrease in the FB zone to 40.9% (Table 2).

When analyzing the effect of different weather under the influence of HMS on the organism of girls of different age groups by the vegetative coefficient, it was found that all groups reacted most sensitively to the combined effect of sunny weather under the influence of HMS.

Under the influence of these factors, in the FG of PSA, there is an increase in the adaptation coefficient from the norm of 0.95–1.05 to 1.09, which indicates the predominance of the SNS in the body with the formation of sympathicotonia. In the FG of the ASA and YSA, a slight parasympathicotonia was detected, characterised by a decrease in the k-AV index to 0.92 and 0.94, respectively. Under the influence of these factors, in the FG of PSA, there is an increase in the adaptation coefficient from the norm of 0.95–1.05 to 1.09, which indicates the predominance of the SNS in the body with the formation of sympathicotonia. In the FG of the PSA and YSA, a slight parasympathicotonia was detected, characterised by a decrease in the k-AV index to 0.92 and 0.94, respectively (Table 3).

Table 2
Adaptive (functional) health of women of different ages under the combined influence of weather and geomagnetic storms

	Age groups	Seasons	
		Sunny + GMS	Cloudy + GMS
SA, %	PSA	40,0	21,0
	ASA	14,3	22,6
	YSA	0	27,3
FB, %	PSA	40,0	55,3
	ASA	44,9	56,5
	YSA	77,8	40,9
PA, %	PSA	20,0	23,7
	ASA	40,8	20,9
	YSA	22,2	31,8

Table 3
Values of the adaptation (vegetative) coefficient k-AV under the combined influence of weather and geomagnetic storms (GMS)

Weather + GMS	PSA	ASA	YSA
Sunny + GMS	1,09	0,92	0,94
Cloudy + GMS	0,99	1,01	1,00

Conclusions

There are three phases in the development of meteotropic reactions: the first is the phase of clinical and physiological adaptation of the body to the effects of atmospheric and physical factors; the second is the phase of increased sensitivity to these factors, manifested by changes in neuropsychological, immune and allergic reactivity; the third is the phase of maladaptation to the weather, which is manifested in healthy people by various functional syndromes. In patients it is manifested by the appearance of clinical and subclinical reactions and exacerbations of diseases, i.e. meteotropic reactions lead to structural and functional changes in the human body, disruption of compensatory reactions which are manifested by various symptom complexes. Cells, tissues and the body as a whole mobilise mechanisms aimed at mitigating and stabilising processes that lead to the strengthening of adaptive mechanisms. It is known that the body's reaction to the weather is determined by gender, age, height, body weight, physique, temperament, diet, etc. With prolonged and repeated exposure to weather and meteorological factors, a reaction of the endocrine system occurs, which is considered as a 'stress reaction' of the general adaptation syndrome. Under their influence, enzymatic processes, the intensity of glycolysis, the level of basic metabolism change and the structure of blood and tissue colloids are disturbed. When determining the degree of climate impact on a person, it should be borne in mind that the body's response to its influence depends on the success of adaptation to weather and climate conditions.

Thus, the study of the influence of meteorological factors under the combined effect of HMS on the body of practically healthy girls of different ages gives grounds to talk about the age-related peculiarities of meteorological variability. It was also confirmed that in a healthy body, changes in

physiological processes and functional activity of systems under the influence of such a factor as weather changes with the simultaneous action of HMS are easily compensated. In these compensatory mechanisms, a special role belongs to the autonomic nervous system, whose activity ensures an adequate response of the body to the influence of environmental

factors. Knowledge about meteosensitivity and meteorological reactions is necessary for the development of both preventive and therapeutic measures aimed at increasing nonspecific resistance and adaptation mechanisms of the body, normalising the function of organs and systems as a basis for normal reactions to adverse environmental changes.

Список використаної літератури

- Єрмішев О.В. Особливості вікової вегетології чоловіків молодого та середнього віку. *Український журнал медицини, біології та спорту*. 2020. Том 5. № 1 (23). С. 322–330. <https://doi.org/10.26693/jmbs05.01.322>.
- Єрмішев О.В., Петрук Р.В., Овчинникова Ю.Ю., Костюк В.В. Функціональне здоров'я дітей як екологічний біоіндикатор України : монографія / за ред. В. Г. Макаца. Вінниця : ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. 226 с.
- Макац В.Г., Єрмішев О.В., Овчинникова Ю.Ю. Основи біоекології, функціональної експертизи та екологічної безпеки. Вінниця : ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. 251 с.
- Abbasi K., Ali P., Barbour V., et al. Time to Treat the Climate and Nature Crisis as One Indivisible Global Health Emergency. *BMJ*. 2023. 5609. <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2023.5609>.
- Berrang-Ford L., Siders A. R., Lesnikowski A. et al. A systematic global stocktake of evidence on human adaptation to climate change. *Nature Climate Change*. 2021. Vol. 11. P. 989–1000. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01170-y>.
- Campbell-Lendrum D., Neville T., Schweizer C., Neira M. Climate change and health: three grand challenges. *Nature Medicine*. 2023. Vol. 29. P. 1631–1638. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02438-w>.
- Chmura H.E., Glass T.W., Williams C.T. Biologging Physiological and Ecological Responses to Climatic Variation: New Tools for the Climate Change Era. *Ecology and Evolution*. 2018. Vol. 6. Article 92. <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00092>.
- Davis G., Lowell W.E. Sunspot data and human longevity. *Data in Brief* 21. 2018. Vol. 21. P. 1579–1590. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.10.168>.
- Furdychko O.I., Mudrak O.V., Yermishev O.V. Vegetative Status of Children as a Territorial Bio-Indicator of Ecological Safety. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020. Vol. 10. № 3. P. 191–196. https://doi.org/10.15421/2020_153.
- Gosling S.N., Hondula D.M., Bunker A., Ibarreta D., Liu J. et al. Adaptation to Climate Change: A Comparative Analysis of Modeling Methods for Heat-Related Mortality. *Environmental Health Perspectives*. 2017. 087008-1. <https://doi.org/10.1289/EHP634>.
- Henderson K., Loreau M. How ecological feedbacks between human population and land cover influence sustainability. *PLoS Comput Biol*. 2018. 14(8): e1006389.
- Hoxha M., Zappacosta B. Meteoropathy: a review on the current state of knowledge. *Journal of medicine and life*. 2023. Vol. 16. № 6. P. 837–841. <https://doi.org/10.25122/jml-2023-0097>.
- Jänig W. Integrative Action of the Autonomic Nervous System. *Neurobiology of Homeostasis*. Cambridge : Cambridge University Press, 2008. 636 p.
- Lenton T. M., Xu C., Abrams J.F. et al. Quantifying the human cost of global warming. *Nature Sustainability*. 2023. Vol. 6. P. 1237–1247. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01132-6>.
- Lüthi S., Fairless C., Fischer E.M. et al. Rapid increase in the risk of heat-related mortality. *Nature Communications*. 2023. Vol. 14. 4894. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40599-x>.
- Morrison T. H., Adger W.N., Agrawal A. et al. Radical interventions for climate-impacted systems. *Nature Climate Change*. 2022. Vol. 12. P. 1100–1106. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01542-y>.
- Myhre G., Alterskjær K., Stjern C.W. et al. Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. 16063. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52277-4>.
- Rahman S., Maximova K., Carson V., Jhangri G.S., Veugelers P.J. Stay in or play out? The influence of weather conditions on physical activity of grade children in Canada. *Canadian journal of public health*. 2019. Vol. 110. № 2. P. 169–177. <https://doi.org/10.17269/s41997-019-00176-6>.

Romanello M., di Napoli C., Green C., Kennard H., Lampard P., Scamman D., et al. The 2023 report of the Lancet Countdown on health and climate change: the imperative for a health-centred response in a world facing irreversible harms. *The Lancet*. 2023. 01859-7. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(23\)01859-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(23)01859-7).

Ripple W.J., Wolf C., Gregg J.W., Levin K., Rockström J., Newsome T.M., et al. World Scientists' Warning of a Climate Emergency. *BioScience*. 2022. Vol. 72. Is. 12. P. 1149–1155. <https://doi.org/10.1093/biosci/biac083>.

Vicedo-Cabrera A.M., Scovronick N., Sera F. et al. The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. *Nature Climate Change*. 2021. Vol. 11. P. 492–500. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01058-x>.

Zareba K., Lasek-Bal A., Student S. The Influence of Selected Meteorological Factors on the Prevalence and Course of Stroke. *Medicina*. 2021. Vol. 57. № 11. 1216. <https://doi.org/10.3390/medicina57111216>.

Zheng C., Feng J., Huang W., Wong S. H. Associations between weather conditions and physical activity and sedentary time in children and adolescents: A systematic review and meta-analysis. *Health & place*. 2021. Vol. 69. 102546. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2021.102546>.

References (translated & transliterated)

Yermishev, O.V. (2020). Osoblyvosti vikovoi vehetolohii cholovikiv molodoho ta serednoho viku [Peculiarities of age-related vegetation of young and middle-aged men]. *Ukrainskyi zhurnal medytsyny, biolohii ta sportu [Ukrainian Journal of Medicine, Biology and Sports]*, 5, 1 (23), 322–330. <https://doi.org/10.26693/jmbs05.01.322> [in Ukrainian].

Yermishev, O.V., Petruk, R.V., Ovchynnykova, Yu.Yu., & Kostiuk, V.V. (2017). Funktsionalne zdorovia ditei yak ekolohichniy bioindykator Ukrainy [Functional health of children as an ecological bioindicator of Ukraine]. Vinnytsia: TOV «Nilan-LTD» [in Ukrainian].

Makats, V.H., Yermishev, O.V., & Ovchynnykova Yu.Yu. (2017). Osnovy bioekolohii, funktsionalnoi ekspertyzy ta ekolohichnoi bezpeky [Basics of bioecology, functional expertise and environmental safety]. Vinnytsia: TOV «Nilan-LTD» [in Ukrainian].

Abbasi, K., Ali, P., & Barbour, V., et al. (2023). Time to Treat the Climate and Nature Crisis as One Indivisible Global Health Emergency. *BMJ*, 5609. <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2023.5609> [in English].

Berrang-Ford, L., Siders A.R., & Lesnikowski, A. et al. (2021). A systematic global stocktake of evidence on human adaptation to climate change. *Nature Climate Change*, 11, 989–1000. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01170-y> [in English].

Campbell-Lendrum, D., Neville, T., Schweizer, C., & Neira, M. (2023). Climate change and health: three grand challenges. *Nature medicine*, 29(7), 1631–1638. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02438-w> [in English].

Chmura, H.E., Glass, T.W., & Williams, C.T. (2018). Biologging Physiological and Ecological Responses to Climatic Variation: New Tools for the Climate Change Era. *Ecology and Evolution*, 6, Article 92. <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00092> [in English].

Davis, G.E., & Lowell, W.E. (2018). Sunspot data and human longevity. *Data in brief*, 21, 1579–1590. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.10.168> [in English].

Furdychko, O.I., Mudrak, O.V., & Yermishev O.V. (2020). Vegetative Status of Children as a Territorial Bio-Indicator of Ecological Safety. *Ukrainian Journal of Ecology*, 10 (3), 191–196. https://doi.org/10.15421/2020_153 [in English].

Gosling, S.N., Hondula, D.M., Bunker, A., Ibarreta, D., Liu, J., Zhang, X., & Sauerborn, R. (2017). Adaptation to Climate Change: A Comparative Analysis of Modeling Methods for Heat-Related Mortality. *Environmental health perspectives*, 125 (8), 087008. <https://doi.org/10.1289/EHP634> [in English].

Henderson, K., & Loreau, M. (2018). How ecological feedbacks between human population and land cover influence sustainability. *PLoS computational biology*, 14 (8), e1006389. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1006389> [in English].

Hoxha, M., & Zappacosta, B. (2023). Meteoropathy: a review on the current state of knowledge. *Journal of medicine and life*, 16 (6), 837–841. <https://doi.org/10.25122/jml-2023-0097> [in English].

Jänig W. (2008). Integrative Action of the Autonomic Nervous System. *Neurobiology of Homeostasis*. Cambridge: Cambridge University Press [in English].

- Lenton, T.M., Xu, C., & Abrams, J.F., et al. (2023). Quantifying the human cost of global warming. *Nature Sustainability*, 6, 1237–1247. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01132-6> [in English].
- Lüthi, S., Fairless, C., & Fischer, E. M., et al. (2023). Rapid increase in the risk of heat-related mortality. *Nature communications*, 14 (1), 4894. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40599-x> [in English].
- Morrison T.H., Adger W.N., & Agrawal, A., et al. (2022). Radical interventions for climate-impacted systems. *Nature Climate Change*, 12, 1100–1106. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01542-y> [in English].
- Myhre, G., Alterskjær, K., & Stjern, C.W., et al. (2019). Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. *Scientific Reports*, 9, 16063. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52277-4> [in English].
- Rahman, S., Maximova, K., Carson, V., Jhangri, G.S., & Veugelers, P.J. (2019). Stay in or play out? The influence of weather conditions on physical activity of grade 5 children in Canada. *Canadian journal of public health = Revue canadienne de sante publique*, 110 (2), 169–177. <https://doi.org/10.17269/s41997-019-00176-6> [in English].
- Romanello, M., Napoli, C.D., Green, C., Kennard, H., Lampard, P., & Scamman, D., et al. (2023). The 2023 report of the Lancet Countdown on health and climate change: the imperative for a health-centred response in a world facing irreversible harms. *Lancet* (London, England), 402 (10419), 2346–2394. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(23\)01859-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(23)01859-7) [in English].
- Ripple W.J., Wolf C., Gregg J.W., Levin K., Rockström J., & Newsome T.M., et al. (2022). World Scientists' Warning of a Climate Emergency. *BioScience*, 72, 12, 1149–1155. <https://doi.org/10.1093/biosci/biac083> [in English].
- Vicedo-Cabrera, A. M., Scovronick, N., & Sera, F., et al. (2021). The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. *Nature climate change*, 11 (6), 492–500. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01058-x> [in English].
- Zareba, K., Lasek-Bal, A., & Student, S. (2021). The Influence of Selected Meteorological Factors on the Prevalence and Course of Stroke. *Medicina (Kaunas, Lithuania)*, 57 (11), 1216. <https://doi.org/10.3390/medicina57111216> [in English].
- Zheng, C., Feng, J., Huang, W., & Wong, S.H. (2021). Associations between weather conditions and physical activity and sedentary time in children and adolescents: A systematic review and meta-analysis. *Health & place*, 69, 102546. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2021.102546> [in English].

Отримано: 27.04.2024
Прийнято: 07.05.2024



UDC [574.586](282.247.32)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.24>

**PATTERNS OF CONTOUR ALGAL COMMUNITIES' FUNCTIONING
IN AQUATIC ECOSYSTEMS OF THE DNIEPER BASIN (UKRAINE) UNDER
DIFFERENT ALTERNATIVE STABLE REGIMES**

N. E. Semenyuk¹, V. I. Shcherbak², Yu. S. Shelyuk³

The paper presents the concept of contour algal communities functioning in aquatic ecosystems of the Dnieper basin under different alternative stable regimes. The major factors are distinguished, which can trigger the shift of the water bodies under study from clear water regime to high turbidity regime: climate change, changes in nutrient conditions and water-level drawdown. In particular, higher water temperature, increase in phosphorus content, a decline in N:P-ratio cause planktonic Cyanobacteria blooms, which intercept solar radiation and suppress photosynthesis of contour algal communities. The water-level drawdown brings about the reduction of the water volume, increase in the nutrient concentration, acceleration of the water column's warming in spring and intensive phytoplankton growth, decreasing the Secchi-disk transparency. In response to the complex effect of these changes contour algal communities activate the mechanisms aimed at maintaining the community's dynamic equilibrium under the unfavorable conditions of high turbidity. These mechanisms include changes in the ratio of phyla with a decrease in the diatoms' share and increase in the shares of green and blue-green algae; gaining the competitive advantage by diatoms from Rhopalodiaceae family with nitrogen-fixing endosymbionts; enlargement in the share of shade-tolerant species and species with high saprobity index. These transformations in the structure of contour algal communities may be of practical value and can be used as reliable biological indicators of regional and global environmental changes.

Key words: contour algal communities, alternative stable states, climate change, nitrogen-to-phosphorus ratio.

¹ Doctor of Sciences in Biology, Senior Researcher
(Institute of Hydrobiology of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv)
e-mail: natasemenyuk@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4447-3507

² Doctor of Sciences in Biology, Professor,
Leading Researcher
(Institute of Hydrobiology of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv)
e-mail: ek424nat@ukr.net
ORCID: 0000-0002-1237-6465

³ Doctor of Sciences in Biology, Professor,
Professor of the Chair of Botany, Bioresources and Biodiversity Conservation
(Zhytomyr Ivan Franko State University, Zhytomyr)
e-mail: Shelyuk_Yulya@ukr.net
ORCID: 0000-0001-6429-1028

ЗАКОНОМІРНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОНТУРНИХ ВОДОРОСТЕВИХ УГРУПОВАНЬ ЗА РІЗНИХ АЛЬТЕРНАТИВНИХ СТАБІЛЬНИХ РЕЖИМІВ ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ БАСЕЙНУ ДНІПРА (УКРАЇНА)

Н. Є. Семенюк, В. І. Щербак, Ю. С. Шелюк

У роботі представлено концепцію функціонування контурних водоростевих угруповань у водних екосистемах басейну Дніпра за різних альтернативних стабільних режимів. Визначено основні чинники, які можуть спричинити перехід досліджуваних водних екосистем з «режиму прозорості води» до «режиму високої каламутності»: кліматичні зміни, зміни біогенного режиму, зниження рівня води. Зокрема, підвищення температури води, зростання вмісту фосфору, зменшення N:P-співвідношення призводить до «цвітіння» води планктонними *Cyanobacteria*, які екранують товщу води та пригнічують фотосинтез контурних водоростевих угруповань. Зниження рівня води прискорює прогрівання товщі води навесні, зумовлює зростання концентрації біогенних елементів та інтенсифікацію розвитку фітопланктону з відповідним зниженням прозорості води. У відповідь на комплексну дію цих змін контурні водоростеві угруповання активують механізми, спрямовані на підтримання динамічної рівноваги в умовах високої каламутності. Ці механізми включають: зміну співвідношення відділів зі зменшенням частки діатомових водоростей і збільшенням – зелених і синьозелених; отримання конкурентної переваги діатомовими водоростями з родини *Rhododiaceae* з азотфіксуючими ендосимбіонтами; зростання частки тіньовитри-валих видів і видів з високим індексом сапробності. Такі трансформації в структурі контурних водоростевих угруповань можуть бути використані як репрезентативні біологічні індикатори регіональних і глобальних змін навколишнього середовища.

Ключові слова: контурні водоростеві угруповання, альтернативні стабільні стани, кліматичні зміни, співвідношення азоту і фосфору.

Introduction

Contour algal communities, i.e. algal communities living at the interface of two phases, are an important component of aquatic ecosystems' biodiversity and are marked by high sensitivity to external impacts (Gosselain et al., 2005; Karosienė & Kasperovičienė, 2012; Zaytsev, 2015).

Among numerous fundamental issues related to studying contour algal communities a valuable place is held by the concept of alternative stable regimes (Scheffer et al., 1992, 1993; Hansson, 1992; Havens et al., 2001; Scheffer & Carpenter, 2003; Scheffer & Van Nes, 2007; Vadeboncoeur et al., 2008; Protasov, 2014; Hilt, 2015). According to this concept, an aquatic ecosystem can stay in one of two alternative regimes: high turbidity regime (when the total primary production is mainly formed by phytoplankton) and clear water regime (when it is mainly formed by contour communities – higher aquatic plants, benthic, epiphytic algae).

High turbidity regime is considered to be more stable than clear water regime, and an aquatic ecosystem's shift from one regime to another depends on nutrient content and phytoplankton abundance affecting the optic characteristics of water.

Different alternative stable regimes may coexist even within a single lake, if it is

marked by a large water area, spatial heterogeneity or varying nutrients inflow from the catchment to different parts of the lake. Such aquatic ecosystems often comprise a mosaic of patches with different alternative regimes, which remain unchanged for a long time until an extreme event (e. g., human impact) triggers a shift in the pattern (Scheffer et al., 2001b; Scheffer & Carpenter, 2003; Janssen et al., 2014). The process, when aquatic ecosystem shifts from high turbidity phase to clear water phase is called contourization, and the reverse process – decontourization (Protasov, 2014).

The alternative stable state theory was originally developed for Dutch lakes (Scheffer et al., 1992, 1993), and is usually applied to natural water bodies. However, as regards large natural-artificial aquatic ecosystems, such as lowland reservoirs, the issue of regime shift is still understudied.

In the view of the above, the aim of this research is to develop the concept of contour algal communities' functioning in aquatic ecosystems of the Dnieper basin under different alternative stable regimes.

Material and methods

The paper is based upon the field studies conducted in various aquatic ecosystems within the Dnieper basin from 2008 to 2021: the cascade of the Dnieper reservoirs and the

Cooling Pond of the Chernobyl Nuclear Power Plant. The research was carried out within the framework of the state research project “Support of development of high-priority areas of research (KPKVK 6541230)”.

Contour (epiphytic) algal communities were sampled from dominant species of higher aquatic plants: *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., *Typha angustifolia* L., *Scirpus lacustris* L., *Nuphar lutea* (L.) Smith, *Nymphaea alba* L., *Trapa natans* L., *Potamogeton perfoliatus* L., *Potamogeton pectinatus* L., *Ceratophyllum demersum* L., *Sagittaria sagittifolia* L., *Myriophyllum spicatum* L. Samples were taken and processed in the laboratory in accordance with the conventional hydrobiological methods (Semenyuk & Shcherbak, 2016).

Algal samples were analyzed under the light microscope MBB-1A with the ocular lens 7×, and the objectives ×40, ×90 (immersion) and under the light microscope Axio Imager A1 at the Research Equipment Center of the Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine. Epiphytic algae biomass was calculated per unit of higher aquatic plants surface (Semenyuk et al., 2020).

The data on inorganic nitrogen and phosphorus content in Kyiv Water Reservoir and Kaniv Water Reservoir are a courtesy of Mariia Linchuk, Junior Researcher.

The algal taxonomic nomenclature is given in accordance with the international electronic catalogue AlgaeBase (Guiry & Guiry, 2023).

Results and discussion

Relation between Secchi-disk transparency and contour algal communities in the context of the alternative stable regimes theory

The box plots summarizing the epiphytic algae biomass values according to the ranges of Secchi-disk transparency in the Dnieper reservoirs show that both the average and the maximal biomasses get higher with the Secchi-disk transparency increasing (Fig. 1). According to Hansson (1988) low transparency suppresses primary production of contour algal communities, even when other resources (such as nutrients) are sufficient and available for algae.

The upper right point on the plot (Fig. 1) may be considered as corresponding to clear water regime, and the lower left point – to high turbidity regime.

According to our previous data, a strong positive relation was detected between Secchi-disk transparency and epiphytic algae gross primary production ($R^2 = 0.73$) and between Secchi-disk transparency and A/R-ratio ($R^2 = 0.81$) (Semenyuk & Shcherbak, 2016). With the water transparency being minimal (0.50–0.75 m), the gross primary production made up 0.06–0.21 (0.13 ± 0.07) $\text{mg O}_2 \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$

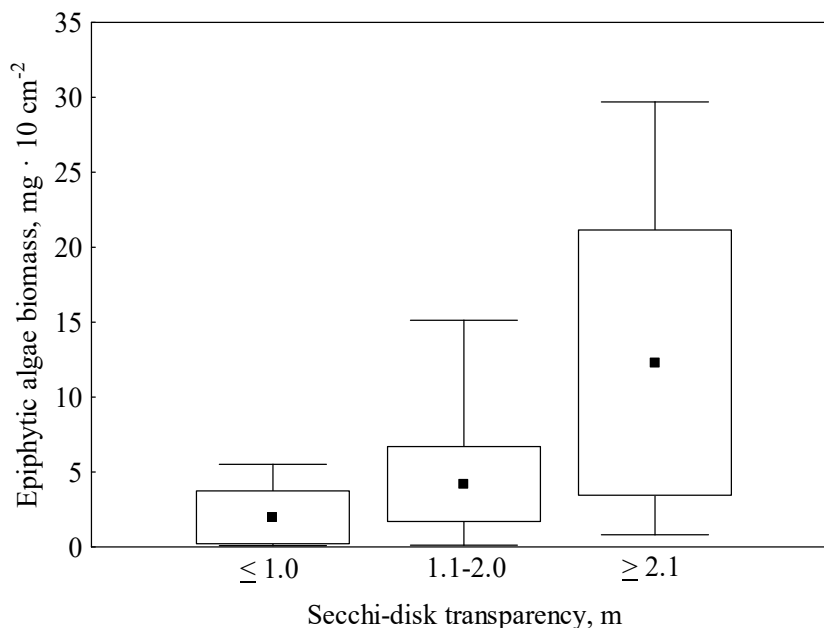


Fig. 1. The box plots summarizing the contour algal communities' biomass values on *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. according to the Secchi-disk transparency ranges in the cascade of the Dnieper reservoir: points – average values, boxes – standard errors, whiskers – fluctuation ranges

of plant surface · day, and A/R-ratio – 0.03–0.11 (0.07±0.02) · day. With Secchi-disk transparency increasing to 1.60–1.70 m, the gross primary production reached 1.31–1.54 (1.42±0.11) mg O₂·10 cm⁻² · day, and A/R-ratio – 0.94–1.67 (1.28±0.08) · day.

Such positive relation between Secchi-disk transparency and contour algal communities' development agree with findings of other researchers (Hansson, 1992; Greenwood & Rosemond, 2005; Oliveria et al., 2010; Cano et al., 2012).

Analysis of the main factors triggering regime shifts

Aquatic ecosystems can shift abruptly from one alternative stable regime to another. Such shift is usually triggered by stochastic events, for example, extreme climatic conditions. However, gradual changes of environmental conditions such as human-induced eutrophication and global warming may have little apparent effect on the regime of ecosystems, but still they alter the “stability domain” of the current regime. Consequently, it becomes more probable that the ecosystem will shift to another alternative regime in response to natural or human-induced fluctuations (Scheffer et al., 2001a).

The long-term field data analysis makes it possible to distinguish the major factors which can trigger aquatic ecosystems' shift from

one alternative regime to another. These are climate change, changes in nutrient conditions and large-scale hydrotechnical operations.

Climate change. The evidence of the current climate change both at a regional and global scale becomes more and more numerous each year (Hartman et al., 2013). An important question unresolved so far is how the warmer climate will affect the probability that shallow lakes will fall into high turbidity regime (Scheffer & Van Nes, 2007).

In the view of the above we have considered the year-on-year dynamics of the water temperature in Kyiv Water Reservoir's shallow areas and biomass of epiphytic algae on emergent plants (Fig. 2).

According to our previous studies (Semenyuk & Shcherbak, 2016), the optimal temperature range for contour algal communities' vegetation in summer is 22–24 °C (shown in Fig. 2 by two dashed lines). It is noteworthy that the peaks of contour algal communities' biomass were observed in years when the water temperature was within the optimal range (2013, 2015). Meanwhile, in years when the water temperature exceeded the optimal range (for example, in 2012, 2014, 2016), the total algal biomass decreased, with the share of diatoms reducing and the share of green algae increasing. This is because green algae gain competitive edge at warmer water temperatures than diatoms.

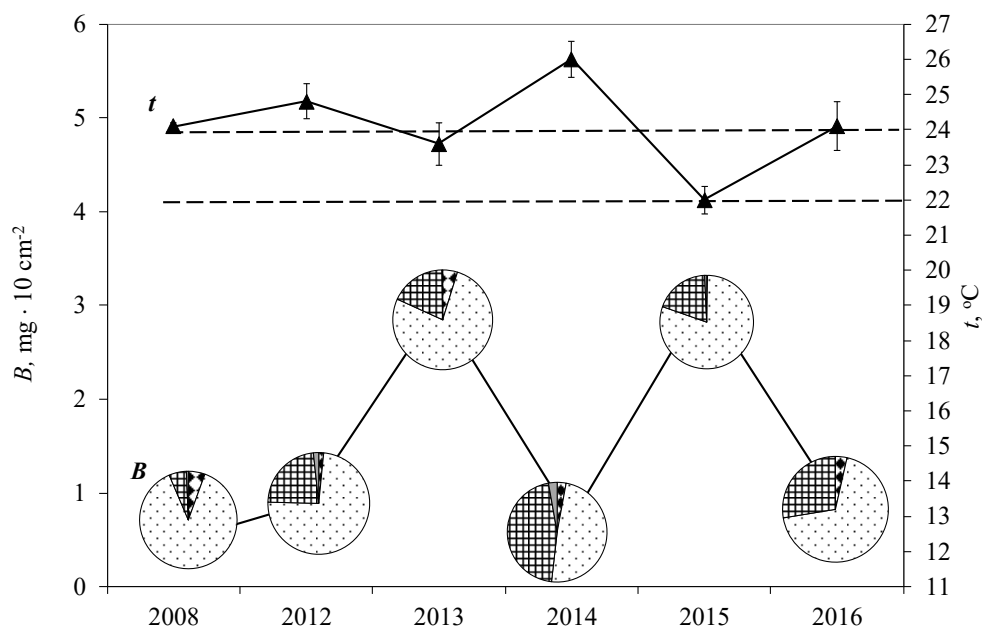


Fig. 2. Year-on-year dynamics of contour algal communities' biomass (B) on emergent plants in and the average water temperature (t) in the lowland reservoir shallow areas in summer (two dashed lines indicate the optimal temperature range for epiphytic algae in summer – 22–24 °C (Semenyuk & Shcherbak, 2016))

In our opinion the reduction of epiphytic algae biomass in years with increased water temperature can be explained by two reasons:

1) Higher temperature negatively affects diatoms – the main component of epiphytic algal communities.

2) Higher temperature affects epiphytic algae indirectly – via phytoplankton. For example, when water temperature increases to 25–26 °C, Cyanobacteria dominate phytoplankton, and algal blooms may occur (Shcherbak, 2019). Consequently, water transparency decreases, and epiphytic algae cannot get sufficient amount of solar radiation.

Thus in the years with the average water temperature in summer 22–24 °C the ecosystem of the reservoir was in clear water regime, and when the water temperature exceeded this range, the ecosystem shifted to high turbidity regime. Cyanobacterial blooms are the main mechanism causing such changes.

It is noteworthy that different (sometimes opposite) theories exist as regards the relation between climate change and alternative stable regimes. For example, Scheffer et al. (2001a, b) show that the probability of clear water phases in spring increased with higher lake water temperature, and decreases in water temperature could create a shift to high turbidity state. This is because higher water temperature causes more intensive phytoplankton grazing by zooplankton. The model also shows that when the water temperature decreases, or the abundance of zooplankton-feeding fishes increases, the clear water phase in spring shifts to a later period. However, Jeppesen et al. (2003) argue that the aforementioned model does not take into consideration a number of important factors. For example, a rise in the water temperature causes increased phytoplankton growth, and favors Cyanobacteria, which are not grazed by small crustacean and may negatively affect the herbivorous zooplankton.

Scheffer & Van Nes (2007) point out that a question of climate change impact upon the aquatic ecosystems' alternative stable regimes is still underexplored, and the results obtained by different authors are sometimes contradictory, so further studies in this area are essential.

Changes in nutrient conditions. In the context of alternative stable regimes theory an important question has been what the critical nutrient level would be for maintaining a clear water regime. Scheffer & Van Nes (2007) come

to a conclusion that such threshold level will be specific for each aquatic ecosystem because it depends on different factors, such as lake size, depth, climate etc.

The nitrogen-to-phosphorus ratio (N:P-ratio) is an important factor, that may cause the aquatic ecosystems within the Dnieper basin to shift from one alternative stable regime to another. It is well known that their current hydrochemical conditions are marked by a reduction in inorganic nitrogen concentration, increase in phosphorus content and, consequently, a decline in N:P-ratio (Shcherbak et al., 2016; Yakushin et al., 2017).

To assess the impact of the N:P-ratio change upon the alternative stable regimes of the aquatic ecosystems of the Dnieper basin we have considered the relationship between the content of nitrogen, phosphorus and contour algal communities' biomass.

Field studies in Kaniv Water Reservoirs showed that the minimums and the maximums of algae biomass on *Potamogeton perfoliatus* L. coincided with minimal and maximal nitrate content (Fig. 3). A direct correlation was detected between the nitrate content and the epiphytic algae biomass ($r = 0.56$; $p = 0.004$).

For example, when the nitrate content varied within 0.037–0.058 mg N · dm⁻³, the epiphytic algae biomass made up 0.060–1.50 mg · 10 cm⁻² of the plant surface, and when the nitrate content was higher – 0.104–0.153 mg N · dm⁻³, the epiphytic algae biomass reached 1.52–2.34 mg · 10 cm⁻² of the plant surface.

Meanwhile, the relationship between the epiphytic algae biomass and the phosphate content was marked by a more complicated pattern (Fig. 4).

The figure shows, that there were peaks of phosphate content, which coincided with maximums of epiphytic algae biomass (for example, 24.06.10, 09.06.11, 05.10.11), and peaks of phosphate content, during which the epiphytic algae biomass was low (for example, 08.07.09, 25.08.10, 17.08.11). It is noteworthy that “synchronous” peaks of phosphate content and epiphytic algae biomass were observed at the beginning of summer or in the middle of autumn, while “asynchronous” peaks were observed in the midsummer or late summer. This pattern may be explained by the fact that in the midsummer and late summer high phosphorus content causes intensive blooms of Cyanobacteria, which reduce water trans-

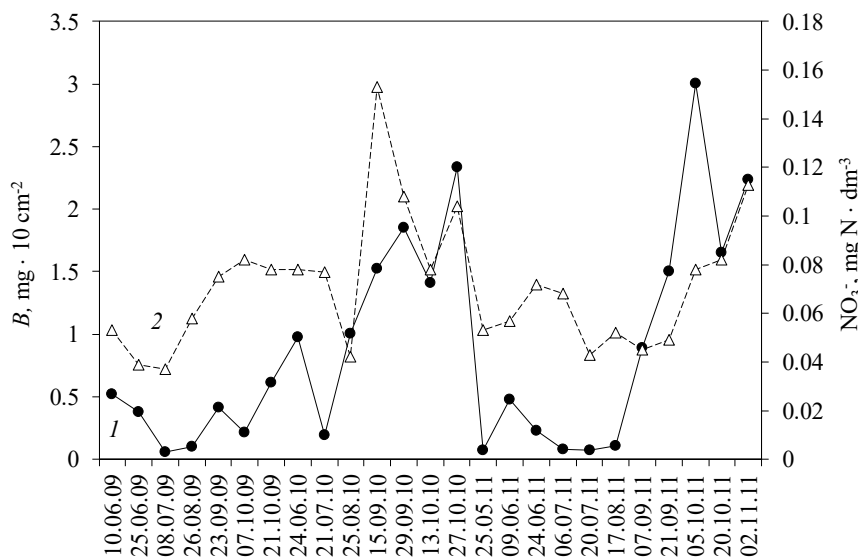


Fig. 3. Dynamics of contour algal communities' biomass on *Potamogeton perfoliatus* L. (1) and nitrate content (2) in the lowland reservoir

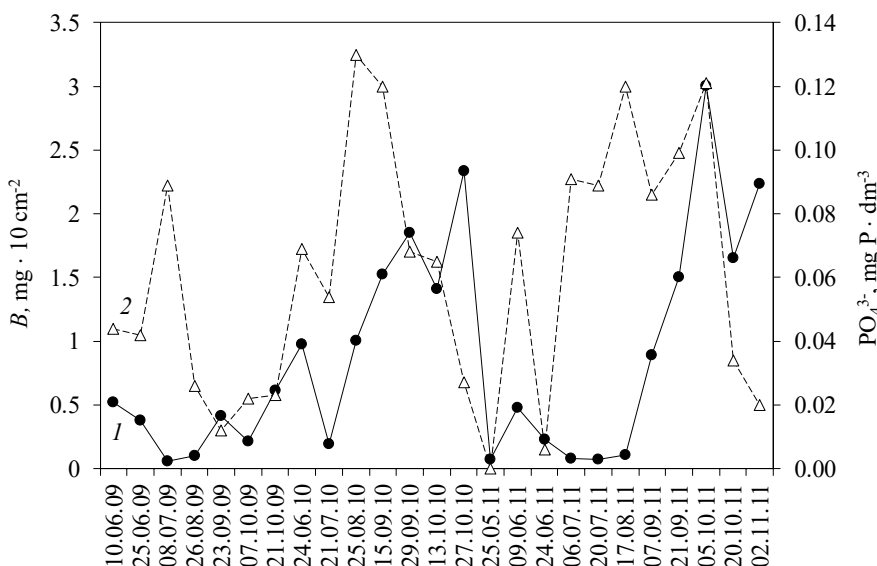


Fig. 4. Dynamics of contour algal communities' biomass on *Potamogeton perfoliatus* L. (1) and phosphate content (2) in the lowland reservoir

parency and suppress the photosynthesis of contour algal communities. Thus, we can come to a conclusion that in the midsummer and late summer the reservoir ecosystem shifts to high turbidity regime. Meanwhile, at the beginning of summer and in autumn the phytoplankton biomass is much lower and does not interfere with epiphytic algae photosynthesis – thus the ecosystem is in clear water regime. The epiphytic algae can use the available phosphate content, and their biomass becomes higher. Therefore, on

the one hand, an increase in the phosphate content has a positive effect upon epiphytic algae growth, but on the other hand, phytoplankton biomass increases simultaneously. Phytoplankton has a competitive advantage over epiphytic algal communities with respect to solar energy, because, being free-floating, it has prior access to light before it reaches epiphytic algae (Hansson, 1988). Due to light extinction by phytoplankton, the aquatic ecosystem shifts to high turbidity regime, and epiphytic algae development is suppressed.

Our previous studies showed a strong direct correlation between epiphytic algae's gross primary production and nitrate content in water ($r = 0.88$; $p = 0.008$) (Semenyuk & Shcherbak, 2017). The similar correlation has been observed for primary production – organic matter destruction ratio (A/R -ratio) ($r = 0.90$; $p = 0.005$), and specific primary production – daily P/B -coefficients ($r = 0.80$; $p = 0.03$). The relationship between epiphytic algae's production parameters and phosphate content is of more complex, curvilinear pattern. The productivity of epiphytic algal communities reaches its maximum, when the phosphate content is within $0.051\text{--}0.086\text{ mg P}\cdot\text{dm}^{-3}$, and declines when the phosphate content deviates from this range.

The findings of our studies agree with literature data. It is known (Hansson, 1988; Lalonde & Downing, 1991; Vadeboncoeur & Steinman, 2002) that in eutrophic water bodies light (rather than phosphorus concentration) can be the limiting resource for periphyton primary production, because high phytoplankton biomass shadows the light and suppresses the photosynthesis of epiphytic algae.

It is necessary to consider another important question related to algal communities' response to changes in nutrient conditions. It is known that when phosphates are present in excess, algal growth is limited by nitrogen compounds, and when the nitrogen content decreases, a competitive advantage is gained by taxa, capable of fixing atmospheric nitrogen (N_2). In other words, algae, which cannot fix molecular nitrogen, grow in proportion to the limits of the low nitrogen resources, while nitrogen-fixing algae may grow in proportion to the phosphorus available in excess. Such nitrogen-fixing taxa include heterocyst-containing Cyanobacteria, for example species from genera *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Nostoc*.

The findings of our previous studies show that blooms of heterocyst-containing Cyanobacteria occur in aquatic ecosystem of the Dnieper basin quite frequently. For example, the summer phytoplankton of the Dnieper Water Reservoirs, the Lower Dnieper, the Chernobyl Nuclear Power Plant Cooling Pond was dominated by *Dolichospermum flosaquae* (Brébisson ex Bornet & Flahault) P. Wacklin, L. Hoffmann & J. Komárek, *D. scheremetieviae* (Elenkin) Wacklin, L. Hoffmann & Komárek, *Aphanizomenon flosaquae* Ralfs ex Bornet & Flahault, *Cuspidothrix issatschenkoi* (Usachev) P. Rajaniemi, Komárek, R. Willame, P. Hrouzek, K. Kastovská, L. Hoffmann & K. Sivonen, caus-

ing intensive blooms (Shcherbak, 2019; Semenyuk et al., 2020; Shcherbak et al., 2020). Besides, we have detected the phenomenon of winter under-ice blooms by *Aphanizomenon gracile* Lemmermann in a pond at the place of a former peat quarry in the flood-land of the Trubizh River (Shcherbak et al., 2019).

It is important that similar mechanisms are pertaining to contour algal communities. When nitrogen is a limiting resource, the competitive edge is gained by taxa, which can fix atmospheric nitrogen and do not depend upon the nitrogen content in the aquatic environment. Such taxa include diatoms from Rhopalodiaceae family (species from genera *Epithemia* Kützing and *Rhopalodia* O. Müller), whose cells contain specific structures – the so called “spheroid bodies”. These “spheroid bodies” are nitrogen-fixing endosymbionts tracing their origin to Cyanobacteria from genus *Cyanothece*. The endosymbionts provide the diatoms with nitrogen compounds, when nitrogen is a limiting resource (Floener & Bothe, 1980; DeYoe et al., 1992; Müller, 1999; Marks & Power, 2001; Prechtel et al., 2004; Nakayama et al., 2010; Trapp et al., 2012).

Our previous studies in Kyiv Water Reservoir show that when the N:P ratio in water decreases, the biomass of species from *Epithemia* and *Rhopalodia* genera goes up (Semenyuk & Shcherbak, 2017).

To prove this pattern, we conducted the similar research for other Dnieper reservoirs located downstream (from Kaniv Water Reservoir to Kakhovka Water Reservoir).

The N:P ratio at each sampling site was calculated from the open data of surface water monitoring, published by the Ukrainian State Water Resources Agency at their official website “Monitoring and Ecological Assessment of Water Resources of Ukraine” (Моніторинг ..., 2024).

As a result, an inverse logarithmic relation between these two parameters was obtained (Fig. 5). When the N:P-ratio is above 15, the biomass of Rhopalodiaceae diatoms is low and makes up <1% of the total biomass. When N:P-ratio is minimal (equal to 4 or less), their share in the biomass reaches the maximum (13% of the total algal community biomass).

It is also necessary to point out, that mass vegetation of planktonic Cyanobacteria from genera *Dolichospermum* (= *Anabaena*), *Aphanizomenon* causes the aquatic ecosystem's transition to high turbidity regime and aggravation of light conditions for epiphytic algae growth.

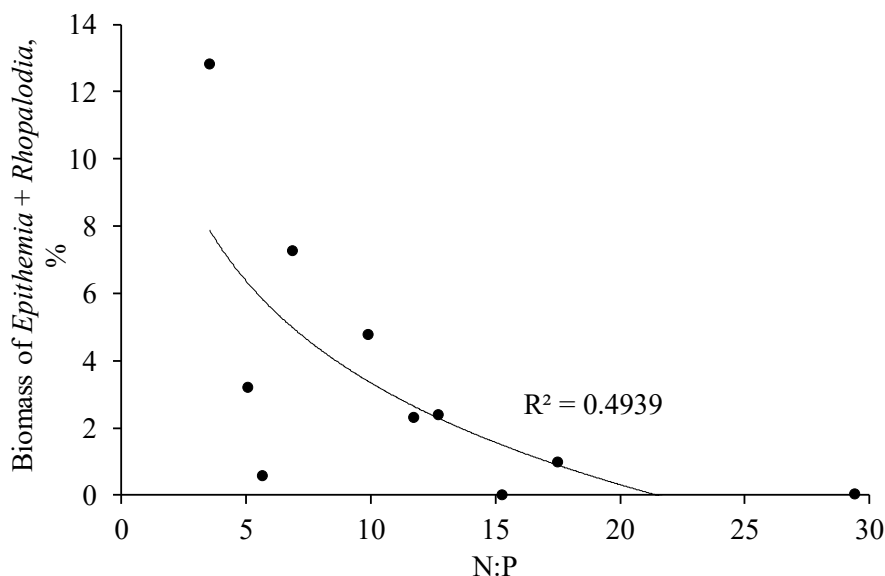


Fig. 5. Inverse logarithmic relation between the N:P-ratio and the share of *Epithemia* and *Rhopalodia* in the biomass of epiphytic algae in the Dnieper Water Reservoirs

However, apart from ability to fix atmospheric nitrogen, species from *Epithemia* and *Rhopalodia* genera have another important biological trait – they are adapted to low level of solar radiation (Müller, 1999). Such shade tolerance allows these species to vegetate under poor light conditions, caused by cyanobacterial blooms.

Thus, the development of species from Rhopalodiaceae family, which are able to fix atmospheric nitrogen and are shade-tolerant, is an important mechanism sustaining functioning of epiphytic algal communities under high turbidity regime caused by an increase in the phosphate content and reduction in the N:P-ratio.

Water-level drawdown. The impact of water-level drawdown upon the alternative stable regimes of aquatic ecosystems was studied in the Chernobyl Nuclear Power Plant Cooling Pond. The large-scale water-level drawdown in the Chernobyl NPP Cooling Pond caused a decline in the quantitative development of periphytic algae. Before the drawdown (as of summer 2013) the algal periphyton biomass had made up $32.470 \pm 5.385 \text{ mg} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$ of the substratum surface. After the water level drawdown almost by four meters the biomass has shrunk to a third of its initial value. For example, in summer 2016 the average biomass equaled to $9.854 \pm 3.030 \text{ mg} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$, in summer 2017 – $10.682 \pm 2.084 \text{ mg} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$, and in summer 2018 – $9.789 \pm 2.168 \text{ mg} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$.

We believe that in this situation the water drawdown acted as an extreme event, which

triggered a shift in the cooling pond's alternative stable regime. With the water volume in the cooling pond becoming less, the nutrient concentration got higher, the spring warming of the water column accelerated, and the overgrowth of higher aquatic plants reduced. All this brought about intensive phytoplankton growth, decrease in Secchi-disk transparency and decline in the biomass of contour algal communities.

However, in response to the water-level drawdown in the Chernobyl NPP Cooling Pond and planktonic Cyanobacteria blooms, the periphytic algal communities activated the mechanisms aimed at maintaining their dynamic equilibrium. For example, there was an increase in the relative share of species from genera *Oscillatoria*, *Epithemia*, *Rhopalodia*, which are considered shade-tolerant (Mur et al., 1977; Scheffer et al., 1997; Müller, 1999), species from genera *Nitzschia*, *Navicula*, which can live in silted habitats, and β -*a*-, *a*-saprobic species. It can be said that periphytic algal communities shifted to a new equilibrium state.

The similar processes of a water body's shift to high turbidity regime are known for Sevan Lake in Armenia. Artificial lowering of the water table, which begun as early as in 1930–1940s and lasted until 1980–1990s, brought about eutrophication of the lake ecosystem, algal blooms, aggravation of oxygen conditions and reduction of the Secchi-disk transparency in 4–5 times as compared with the period before the water-level drawdown (Parparov, 1990).

Mechanisms of epiphytic algal communities' functioning in aquatic ecosystems of the Dnieper basin under different alternative stable regimes

Summarizing of our findings set forth above makes it possible to formulate the concept of this research, which is illustrated by Fig. 6. The concept is based on the alternative stable regimes theory (Scheffer et al., 1992, 1993; Scheffer & Carpenter, 2003; Scheffer & Van Nes, 2007) and describes the contour algal communities' development under different alternative stable regimes in the aquatic ecosystems of the Dnieper basin and also may be applied to similar natural-artificial water bodies, in particular, water reservoirs in large low-land rivers.

Conclusion

Analysis of the long-term field data obtained in aquatic ecosystems of the Dnieper basin has made it possible to distinguish the major factors which can trigger aquatic ecosystems'

shift from clear water regime to high turbidity regime: climate change, changes in nutrient conditions and water-level drawdown.

In response to the complex effect of these changes contour algal communities activate the mechanisms aimed at mitigating the negative consequences of such impact and at maintaining the community's dynamic equilibrium in the unfavorable conditions of high turbidity.

These mechanisms include changes in the ratio of phyla with a decrease in the diatoms' share and increase in the shares of green and blue-green algae; increase in the abundance of nitrogen-fixing species; enlargement in the share of shade-tolerant species and species with high saprobity index.

The above-mentioned transformations in the structure of contour algal communities may be of practical value and can be used as reliable biological indicators of regional and global environmental changes.

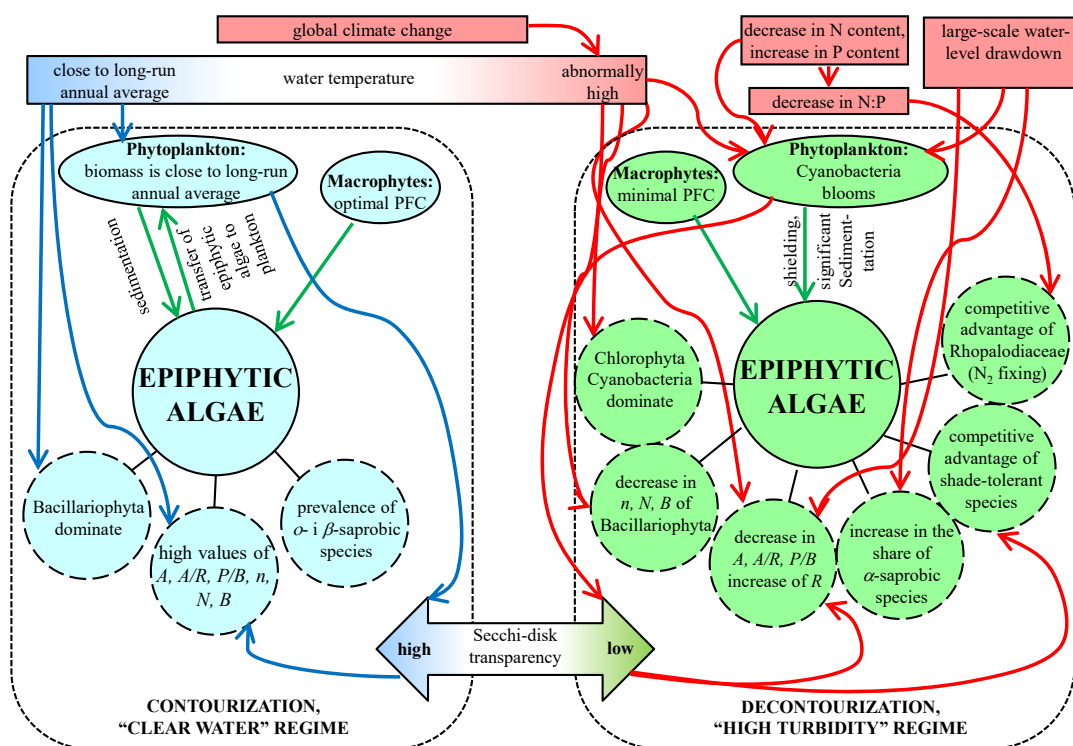


Fig. 6. Contour algal communities under different alternative stable regimes in aquatic ecosystems of the Dnieper basin: PFC – projective foliage cover, A – primary production, n – species richness, N – cell count, B – biomass, R – organic matter destruction, P/B – specific production, N – nitrogen, P – phosphorus

Список використаної літератури

Cano M.G., Casco M.A., Claps M.C. Effect of environmental variables on epiphyton in a Pampean lake with stable turbid-and clear-water states. *Aquatic Biology*. 2012. № 15. P. 47–59. <https://doi.org/10.3354/ab00409>.

- DeYoe H.R., Lowe R.L., Marks J.C. Effects of nitrogen and phosphorus on the endosymbiont load of *Rhopalodia gibba* and *Epithemia turgida* (Bacillariophyceae). *Journal of Phycology*. 1992. № 28. P. 773–777. <https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1992.00773.x>.
- Floener L., Bothe H. Nitrogen fixation in *Rhopalodia gibba*, a diatom containing blue-greenish inclusions symbiotically. In: *Endocytobiology: Endosymbiosis and Cell Biology, a Synthesis of Recent Research*. Ed. by Schwemmler W., Schenk H. Berlin: Walter de Gruyter and Co., 1980. P. 541–552. <https://doi.org/10.1515/9783111385068-053>.
- Gosselain V., Hudon Ch., Cattaneo A., Gagnon P., Planas D., Rochefort D. Physical variables driving epiphytic algal biomass in a dense macrophyte bed of the St. Lawrence River (Quebec, Canada). *Hydrobiologia*. 2005. № 534. P. 11–22. <https://doi.org/10.1007/s10750-004-1318-z>.
- Greenwood J.L., Rosemond A.D. Periphyton response to long-term nutrient enrichment in a shaded headwater stream. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2005. № 62. P. 2033–2045. <https://doi.org/10.1139/f05-117>.
- Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. [Electronic resource] URL: <http://www.algaebase.org> (access date 02.02.2023).
- Hansson L.-A. Effects of competitive interactions on the biomass development of planktonic and periphytic algae in lakes. *Limnology and Oceanography*. 1988. № 33 (1). P. 121–128. <https://doi.org/10.4319/lo.1988.33.1.0121>.
- Hansson L.-A. Factors regulating periphytic algal biomass. *Limnology and Oceanography*. 1992. № 37 (2). P. 322–328. <https://doi.org/10.4319/lo.1992.37.2.0322>.
- Hartmann D.L., Klein Tank AMG, Rusticucci M., Alexander L.V., Brönnimann S., Charabi Y., Dentener F.J., Dlugokencky E.J., Easterling D.R., Kaplan A., Soden B.J., Thorne P.W., Wild M., Zhai P.M. Observations: atmosphere and surface. In: *Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, NY, 2013.
- Havens K.E., Hauxwell J., Tyler A.C., Thomas S., McGlathery K.J., Cebrian J., Valiela I., Steinman A.D., Hwang S.-J. Complex interaction between autotrophs in shallow marine and freshwater ecosystems: implications for community responses to nutrient stress. *Environmental Pollution*. 2001. № 113. P. 95–107. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00154-8](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00154-8).
- Hilt S. Regime shifts between macrophytes and phytoplankton – concepts beyond shallow lakes, unravelling stabilizing mechanisms and practical consequences. *Limnetica*. 2015. № 34 (2). P. 467–480. <https://doi.org/10.23818/limn.34.35>.
- Janssen A.B.G., Teurlincx S., An, S., Janse J.H., Paerl H.W., Mooij W.M. Alternative stable states in large shallow lakes? *Journal of Great Lakes Research*. 2014. № 40. P. 813–826. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2014.09.019>.
- Jeppesen E., Søndergaard M., Jensen J.P. Climatic warming and regime shifts in lake food webs – some comments. *Limnology and Oceanography*. 2003. № 48 (3). P. 1346–1349. <https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.3.1346>.
- Karosienė J., Kasperovičienė J. Peculiarities of epiphyton algal communities formation on different macrophyte species. *Botanica Lithuanica*. 2012. № 18 (2). P. 154–163. <https://doi.org/10.2478/v10279-012-0017-3>.
- Lalonde S., Downing J.A. Epiphyton biomass is related to lake trophic status, depth, and macrophyte architecture. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1991. № 48. P. 2285–2291. <https://doi.org/10.1139/f91-268>.
- Marks J.C., Power M.E. Nutrient induced changes in the species composition of epiphytes on *Cladophora glomerata* Kütz. (Chlorophyta). *Hydrobiologia*. 2001. № 450. P. 187–196. <https://doi.org/10.1023/A:1017596927664>.
- Müller U. The vertical zonation of adressed diatoms and other epiphytic algae on *Phragmites australis*. *European Journal of Phycology*. 1999. № 34 (5). P. 487–496. <https://doi.org/10.1080/09541449910001718841>.
- Mur L.R., Gons H.J., Van Liere L. Some experiments on the competition between green algae and blue-green bacteria in light-limited environments. *FEMS Microbiology Letters*. 1977. № 1 (6). P. 335–338. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1977.tb00646.x>.
- Nakayama Takuro Ikegami Y., Nakayama Takeshi Ishida K.-I., Inagaki Y., Inouye I. Spheroid bodies in rhopalodiacean diatoms were derived from a single endosymbiotic cyanobacterium. *Journal of Plant Research*. 2010. № 124. P. 93–97. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10265-010-0355-0>.

Oliveria D.E., Ferragut C., Bicudo D.C. Relationships between environmental factors, periphyton biomass and nutrient content in Garças Reservoir, a hypereutrophic tropical reservoir in southeastern Brazil. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*. 2010. № 15. P. 129–137. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1770.2010.00428.x>.

Parparov A.S. Some characteristics of the community of autotrophs of Lake Sevan in connection with its eutrophication. *Hydrobiologia*. 1990. № 191. P. 15–21. <https://doi.org/10.1007/BF00026034>.

Precht J., Kneip C., Lockhart P., Wenderoth K., Maier U.-G. Intracellular spheroid bodies of *Rhopalodia gibba* have nitrogen-fixing apparatus of cyanobacterial origin. *Molecular Biology and Evolution*. 2004. № 21. P. 1477–1481. <https://doi.org/10.1093/molbev/msh086>.

Protasov A.A. Conceptual models of the contourization processes in the aquatic ecosystems. *Hydrobiological Journal*. 2014. № 50 (1). P. 3–19. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v50.i1.10>.

Scheffer M., De Redelijkheid R. M. R., Noppert F. Distribution and dynamics of submerged vegetation in a chain of shallow eutrophic lakes. *Aquatic Botany*. 1992. № 42. P. 199–216. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(92\)90022-B](https://doi.org/10.1016/0304-3770(92)90022-B).

Scheffer M., Hosper S.H., Meijer M.-L., Moss B., Jeppesen E. Alternative equilibria in shallow lakes. *Trends in Ecology and Evolution*. 1993. № 8. P. 275–279. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(93\)90254-M](https://doi.org/10.1016/0169-5347(93)90254-M).

Scheffer M., Rinaldi S., Gagnani A., Mur L.R., Van Nes E.H. On the dominance of filamentous Cyanobacteria in shallow, turbid lakes. *Ecology*. 1997. № 78 (1). P. 272–282. <https://doi.org/10.2307/2265995>.

Scheffer M., Carpenter S., Foley J.A., Folke C., Walker B. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*. 2001a. № 413. P. 591–596. <https://doi.org/10.1038/35098000>.

Scheffer M., Straile D., Van Nes E., Hosper H. Climatic warming causes regime shifts in lake food webs. *Limnology and Oceanography*. 2001b. № 46. P. 1780–1783. <https://doi.org/10.4319/lo.2001.46.7.1780>.

Scheffer M., Carpenter S.R. Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. *Trends in Ecology and Evolution*. 2003. № 18 (12). P. 648–656. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2003.09.002>.

Scheffer M., Van Nes E.H. Shallow lakes theory revisited: various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size. *Hydrobiologia*. 2007. № 584. P. 455–466. <https://doi.org/10.1007/s10750-007-0616-7>.

Semenyuk N. Ye., Shcherbak V.I. Structural and functional organization of phytoepiphyton of the Dnieper reservoirs and factors influencing its development. Report 1. Role of some hydrophysical factors. *Hydrobiological Journal*. 2016. № 52 (5). P. 3–17. [10.1615/HydrobJ.v52.i5.10](https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v52.i5.10).

Semenyuk N. Ye., Shcherbak V.I. Structural and functional organization of phytoepiphyton of the Dnieper reservoirs and factors influencing its development. Report 2. Role of hydrological and hydrochemical factors. *Hydrobiological Journal*. 2017. № 53 (2). P. 3–15. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v53.i2.10>.

Semenyuk N.Ye., Shcherbak V.I., Sherman I.M., Kutishchev P.S. Characteristics of the autotrophic link of the Kardashyn Liman of the Dnieper-Bug Estuary (Ukraine). *Hydrobiological Journal*. 2020. № 56 (3). P. 30–45. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v56.i3.30>.

Shcherbak V.I. Response of phytoplankton of the Kiev Reservoir to the increase in summer temperatures. *Hydrobiological Journal*. 2019. № 55 (1). P. 18–35. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v55.i1.20>.

Shcherbak V.I., Yakushin V.M., Zadorozhnaya A.M., Semenyuk N.Ye., Linchuk M.I. Seasonal and interannual dynamics of phytoplankton, phytomicroepiphyton, and nutrients content in the River Section of the Kanev Reservoir. *Hydrobiological Journal*. 2016. № 52 (1). P. 49–61. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v52.i1.50>.

Shcherbak V.I., Semenyuk N.Ye., Linchuk M.I. Winter under the ice water bloom formed by *Aphanizomenon gracile* Lemmermann. *Hydrobiological Journal*. 2019. № 55 (5). P. 20–34. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v55.i5.20>.

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. *Ecology and Hydrobiology*. 2020. № 20 (1). P. 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2019.07.001>.

Trapp E.M., Adler S., Zauner S., Maier U.-G. *Rhopalodia gibba* and its endosymbionts as a model for early steps in a cyanobacterial primary endosymbiosis. *Journal of Endocytobiosis and Cell Research*. 2012. № 23. P. 21–24.

Vadeboncoeur Y., Steinman A.D. Periphyton functions in lake ecosystems. *The Scientific World*. 2002. № 2. P. 1449–1468. <https://doi.org/10.1100/tsw.2002.294>.

Vadeboncoeur Y., Peterson G., Jake Vander Zanden M., Kalff J. Benthic algal production across lake size gradients: interactions among morphometry, nutrients and light. *Ecology*. 2008. № 89 (9). P. 2542–2552. <https://doi.org/10.1890/07-1058.1>.

Yakushin V.M., Shcherbak V.I., Semenyuk N.Ye., Linchuk M.I. Hydrochemical characteristics of the Kiev Reservoir at the present time. *Hydrobiological Journal*. 2017. № 53 (6). P. 96–109. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v53.i6.100>.

Zaytsev Yu.P. On contour structure of biosphere. *Hydrobiological Journal*. 2015. № 51 (3). P. 3–24. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v51.i3.10>.

Моніторинг та екологічна оцінка водних ресурсів України. Державне агентство водних ресурсів України [Електронний ресурс]. URL: <http://monitoring.davr.gov.ua/EcoWaterMon/GDKMap/Index> (дата звернення 10.04.2024).

References (translated & transliterated)

Cano, M.G., Casco, M.A., & Claps, M.C. (2012). Effect of environmental variables on epiphyton in a Pampean lake with stable turbid-and clear-water states. *Aquatic Biology*, 15, 47–59. <https://doi.org/10.3354/ab00409> [in English].

DeYoe, H.R., Lowe, R.L., & Marks, J.C. (1992). Effects of nitrogen and phosphorus on the endosymbiont load of *Rhopalodia gibba* and *Epithemia turgida* (Bacillariophyceae). *Journal of Phycology*, 28, 773–777. <https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1992.00773.x> [in English].

Floener, L., & Bothe, H. (1980). Nitrogen fixation in *Rhopalodia gibba*, a diatom containing blue-greenish inclusions symbiotically. In: *Endocytobiology: Endosymbiosis and Cell Biology, a Synthesis of Recent Research*. Ed. by Schwemmler W., Schenk H. Berlin: Walter de Gruyter and Co., pp. 541–552. <https://doi.org/10.1515/9783111385068-053> [in English].

Gosselain, V., Hudon, Ch., Cattaneo, A., Gagnon, P., Planas, D., & Rochefort, D. (2005). Physical variables driving epiphytic algal biomass in a dense macrophyte bed of the St. Lawrence River (Quebec, Canada). *Hydrobiologia*, 534, 11–22. <https://doi.org/10.1007/s10750-004-1318-z> [in English].

Greenwood, J.L., & Rosemond, A.D. (2005). Periphyton response to long-term nutrient enrichment in a shaded headwater stream. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 62, 2033–2045. <https://doi.org/10.1139/f05-117> [in English].

Guiry, M.D., & Guiry, G.M. (2023). AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway [Electronic resource] URL: <http://www.algaebase.org> (access date 02.02.2023) [in English].

Hansson, L.-A. (1988). Effects of competitive interactions on the biomass development of planktonic and periphytic algae in lakes. *Limnology and Oceanography*, 33 (1), 121–128. <https://doi.org/10.4319/lo.1988.33.1.0121> [in English].

Hansson, L.-A. (1992). Factors regulating periphytic algal biomass. *Limnology and Oceanography*, 37 (2), 322–328. <https://doi.org/10.4319/lo.1992.37.2.0322> [in English].

Hartmann, D.L., Klein, Tank AMG, Rusticucci, M., Alexander, L.V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F.J., Dlugokencky, E.J., Easterling, D.R., Kaplan, A., Soden, B.J., Thorne, P.W., Wild, M., & Zhai, P.M. (2013). Observations: atmosphere and surface. In: *Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York. NY [in English].

Havens, K.E., Hauxwell, J., Tyler, A.C., Thomas, S., McGlathery, K.J., Cebrian, J., Valiela, I., Steinman, A.D., & Hwang, S.-J. (2001). Complex interaction between autotrophs in shallow marine and freshwater ecosystems: implications for community responses to nutrient stress. *Environmental Pollution*, 113, 95–107. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00154-8](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00154-8) [in English].

Hilt, S. (2015). Regime shifts between macrophytes and phytoplankton – concepts beyond shallow lakes, unravelling stabilizing mechanisms and practical consequences. *Limnetica*, 34 (2), 467–480. <https://doi.org/10.23818/limn.34.35> [in English].

Janssen, A.B.G., Teurlincs, S., An, S., Janse, J.H., Paerl, H.W., & Mooij, W.M. (2014). Alternative stable states in large shallow lakes? *Journal of Great Lakes Research*, 40, 813–826. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2014.09.019> [in English].

Jeppesen, E., Søndergaard, M., & Jensen, J.P. (2003). Climatic warming and regime shifts in lake food webs – some comments. *Limnology and Oceanography*, 48 (3), 1346–1349. <https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.3.1346> [in English].

Karosienė, J., & Kasperovičienė, J. (2012). Peculiarities of epiphyton algal communities formation on different macrophyte species. *Botanica Lithuanica*, 18 (2), 154–163. <https://doi.org/10.2478/v10279-012-0017-3> [in English].

Lalonde, S., & Downing, J.A. (1991). Epiphyton biomass is related to lake trophic status, depth, and macrophyte architecture. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 48, 2285–2291. <https://doi.org/10.1139/f91-268> [in English].

Marks, J.C., & Power, M.E. (2001). Nutrient induced changes in the species composition of epiphytes on *Cladophora glomerata* Kütz. (Chlorophyta). *Hydrobiologia*, 450, 187–196. <https://doi.org/10.1023/A:1017596927664> [in English].

Müller, U. (1999). The vertical zonation of adressed diatoms and other epiphytic algae on *Phragmites australis*. *European Journal of Phycology*, 34 (5), 487–496. <https://doi.org/10.1080/09541449910001718841> [in English].

Mur, L.R., Gons, H.J., & Van Liere, L. (1977). Some experiments on the competition between green algae and blue-green bacteria in light-limited environments. *FEMS Microbiology Letters*, 1 (6), 335–338. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1977.tb00646.x> [in English].

Nakayama Takuro Ikegami, Y., Nakayama Takeshi Ishida, K.-I., Inagaki, Y., & Inouye, I. (2010). Spheroid bodies in rhopalodiacean diatoms were derived from a single endosymbiotic cyanobacterium. *Journal of Plant Research*, 124, 93–97. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10265-010-0355-0> [in English].

Oliveria, D.E., Ferragut, C., & Bicudo, D.C. (2010). Relationships between environmental factors, periphyton biomass and nutrient content in Garças Reservoir, a hypereutrophic tropical reservoir in southeastern Brazil. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 15, 129–137. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1770.2010.00428.x> [in English].

Parparov, A.S. (1990). Some characteristics of the community of autotrophs of Lake Sevan in connection with its eutrophication. *Hydrobiologia*, 191, 15–21. <https://doi.org/10.1007/BF00026034> [in English].

Prechtel, J., Kneip, C., Lockhart, P., Wenderoth, K., & Maier, U.-G. (2004). Intracellular spheroid bodies of *Rhopalodia gibba* have nitrogen-fixing apparatus of cyanobacterial origin. *Molecular Biology and Evolution*, 21, 1477–1481. <https://doi.org/10.1093/molbev/msh086> [in English].

Protasov, A.A. (2014). Conceptual models of the contourization processes in the aquatic ecosystems. *Hydrobiological Journal*, 50 (1), 3–19. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v50.i1.10> [in English].

Scheffer, M., De Redelijkheid, R. M. R., & Noppert, F. (1992). Distribution and dynamics of submerged vegetation in a chain of shallow eutrophic lakes. *Aquatic Botany*, 42, 199–216. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(92\)90022-B](https://doi.org/10.1016/0304-3770(92)90022-B) [in English].

Scheffer, M., Hosper, S.H., Meijer, M.-L., Moss, B., & Jeppesen, E. (1993). Alternative equilibria in shallow lakes. *Trends in Ecology and Evolution*, 8, 275–279. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(93\)90254-M](https://doi.org/10.1016/0169-5347(93)90254-M) [in English].

Scheffer, M., Rinaldi, S., Gragnani, A., Mur, L.R., & Van Nes, E.H. (1997). On the dominance of filamentous Cyanobacteria in shallow, turbid lakes. *Ecology*, 78 (1), 272–282. <https://doi.org/10.2307/2265995> [in English].

Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J.A., Folke, C., & Walker, B. (2001a). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413, 591–596. <https://doi.org/10.1038/35098000> [in English].

Scheffer, M., Straile, D., Van Nes, E., & Hosper, H. (2001b). Climatic warming causes regime shifts in lake food webs. *Limnology and Oceanography*, 46, 1780–1783. <https://doi.org/10.4319/lo.2001.46.7.1780> [in English].

Scheffer, M., & Carpenter, S.R. (2003). Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. *Trends in Ecology and Evolution*, 18 (12), 648–656. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2003.09.002> [in English].

Scheffer, M., & Van Nes, E.H. (2007). Shallow lakes theory revisited: various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size. *Hydrobiologia*, 584, 455–466. <https://doi.org/10.1007/s10750-007-0616-7> [in English].

Semenyuk, N.Ye., & Shcherbak, V.I. (2016). Structural and functional organization of phytoepiphyton of the Dnieper reservoirs and factors influencing its development. Report 1. Role of

some hydrophysical factors. *Hydrobiological Journal*, 52 (5), 3–17. 10.1615/HydrobJ.v52.i5.10 [in English].

Semenyuk, N.Ye., & Shcherbak, V.I. (2017). Structural and functional organization of phytoepiphyton of the Dnieper reservoirs and factors influencing its development. Report 2. Role of hydrological and hydrochemical factors. *Hydrobiological Journal*, 53 (2), 3–15. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v53.i2.10> [in English].

Semenyuk, N.Ye., Shcherbak, V.I., Sherman, I.M., & Kutishchev, P.S. (2020). Characteristics of the autotrophic link of the Kardashyn Liman of the Dnieper-Bug Estuary (Ukraine). *Hydrobiological Journal*, 56 (3), 30–45. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v56.i3.30> [in English].

Shcherbak, V.I. (2019). Response of phytoplankton of the Kiev Reservoir to the increase in summer temperatures. *Hydrobiological Journal*, 55 (1), 18–35. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v55.i1.20> [in English].

Shcherbak, V.I., Yakushin, V.M., Zadorozhnaya, A.M., Semenyuk, N.Ye., & Linchuk, M.I. (2016). Seasonal and interannual dynamics of phytoplankton, phytomicroepiphyton, and nutrients content in the River Section of the Kanev Reservoir. *Hydrobiological Journal*, 52 (1), 49–61. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v52.i1.50> [in English].

Shcherbak, V.I., Semenyuk, N.Ye., & Linchuk, M.I. (2019). Winter under the ice water bloom formed by *Aphanizomenon gracile* Lemmermann. *Hydrobiological Journal*, 55 (5), 20–34. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v55.i5.20> [in English].

Shcherbak, V., Sherman, I., Semeniuk, N., & Kutishchev, P. (2020). 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*, 20 (1), 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2019.07.001> [in English].

Trapp, E.M., Adler, S., Zauner, S., & Maier, U.-G. (2012). *Rhopalodia gibba* and its endosymbionts as a model for early steps in a cyanobacterial primary endosymbiosis. *Journal of Endocytobiosis and Cell Research*, 23, 21–24 [in English].

Vadeboncoeur, Y., & Steinman, A.D. (2002). Periphyton functions in lake ecosystems. *The Scientific World*, 2, 1449–1468. <https://doi.org/10.1100/tsw.2002.294> [in English].

Vadeboncoeur, Y., Peterson, G., Jake Vander Zanden, M., & Kalf, J. (2008). Benthic algal production across lake size gradients: interactions among morphometry, nutrients and light. *Ecology*, 89 (9), 2542–2552. <https://doi.org/10.1890/07-1058.1> [in English].

Yakushin, V.M., Shcherbak, V.I., Semenyuk, N.Ye., & Linchuk, M.I. (2017). Hydrochemical characteristics of the Kiev Reservoir at the present time. *Hydrobiological Journal*, 53 (6), 96–109. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v53.i6.100> [in English].

Zaytsev, Yu.P. (2015). On contour structure of biosphere. *Hydrobiological Journal*, 51 (3), 3–24. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v51.i3.10> [in English].

Monitorynh ta ekolohichna otsinka vodnykh resursiv Ukrayiny. Derzhavne ahentstvo vodnykh resursiv Ukrayiny [Monitoring and environmental assessment of water resources of Ukraine. State Agency of Water Resources of Ukraine]. [Electronic resource] URL: <http://monitoring.davr.gov.ua/EcoWaterMon/GDKMap/Index> (access date 10.04.2024) [in Ukrainian].

Отримано: 25.04.2024

Прийнято: 06.05.2024



УДК 574.5(262.5.05)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.25>

АБІОТИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ЕКОСИСТЕМ МИСІВ ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОЇ ЧАСТИНИ ЧОРНОГО МОРЯ

О. К. Виноградов¹, Ю. І. Богатова², І. О. Синьогуб³

У статті проаналізовано та узагальнено відомості про утворення, трансформацію та абіотичні особливості кам'яних мисів у бідній твердими субстратами північно-західній частині Чорного моря (ПЗЧМ). Дослідження екосистем мисів (ЕМ) – тверді субстрати, гідродинаміка, якість водного середовища, проводили в Одеському морському регіоні у 1991–2021 рр. У літературних джерелах миси, як особливий тип екосистем, раніше не розглядалися. Відповідно до сучасних уявлень, кам'яні миси є компонентами глобального прибережно-шельфового біотопу перифіталі. У ПЗЧМ вони формуються в контактній зоні «суша – море – атмосфера» у процесі трансгресії, зсувів та розмиву м'яких ґрунтів. Кам'яні миси виконують роль каркасу берегової лінії, утримуючи піщані пересипи лиманів та пляжі від розмиву під час уздовжберегової міграції наносів. ЕМ знаходяться в динамічному зв'язку з пухкими донними ґрунтами, що примикають до них, відрізняються найбільшою біотопічною різноманітністю серед усіх прибережних екосистем. Для ЕМ характерна стабільність (десятиліття, століття) великих уламків, мінливість (тижні, місяці) пухких опадів та висока динамічність водної маси (години, доби). Миси знаходяться під впливом вітрів, хвиль, течії, що забезпечує вентиляцію їх екосистем, переешкоджає накопиченню метаболітів, зараженню всієї водної товщі H_2S і розвитку гострої гіпоксії, створює сприятливі умови для гідробіонтів з різних систематичних груп за температурою, солоністю, вмістом розчиненого O_2 , величиною рН. У випадках виходу сірководню на прибережні мілководдя, ЕМ стають резерватами для гідробіонтів, що населяють сусідні екосистеми. Показано, що миси відіграють надзвичайно важливу роль у збереженні біот і самі потребують спеціальної охорони.

Ключові слова: миси, твердий субстрат, перифіталі, абіотичні особливості, північно-західна частина Чорного моря.

¹ доктор біологічних наук, старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник
(ДУ «Інститут морської біології НАН України», м. Одеса)
ORCID: 0000-0002-5031-6316

² кандидат географічних наук, старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник
(ДУ «Інститут морської біології НАН України», м. Одеса)
e-mail: bogatovayu@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0753-1122

³ старший науковий співробітник
(ДУ «Інститут морської біології НАН України», м. Одеса)
ORCID: 0000-0003-4787-1332

ABIOTIC FEATURES OF CAPE ECOSYSTEMS OF THE NORTHWESTERN PART OF THE BLACK SEA

O. K. Vinogradov, Yu. I. Bogatova, I. O. Synyogub

The information on the formation, transformation and abiotic features of rocky capes in the northwestern part of the Black Sea (NWBS) poor with hard substrata was analyzed and summarized. Studies of cape ecosystems (CE) – solid substrates, hydrodynamics, water environment quality, were conducted in 1991–2021 in the sea region of Odessa. Literature sources have not previously considered capes as a special type of ecosystems. According to current consensus, rocky capes are components of the global coastal-shelf biotope of the periphytal. In the NWBS they are formed in the «land – sea – atmosphere» contact zone during the process of transgression, landsliding and erosion of soft soils. Rocky capes act as skeleton for the coastline, protecting the sandy banks of estuaries and beaches from erosion during the longshore migration of sediments. CE are in dynamic relationship with the loose bottom soils adjacent to them and are characterized by the greatest biotope diversity among all coastal ecosystems. CE are characterized by the stability (decades, centuries) of large fractions, the variability (weeks, months) of loose deposits and the high dynamics (hours, days) of the water mass. Capes are under the influence of winds, waves and currents, all of which provide ventilation of their ecosystems. They also prevent the accumulation of metabolites, the contamination of the entire water column with H₂S and the development of acute hypoxia. Finally, they create favorable conditions for hydrobionts from different systematic groups in terms of temperature, salinity, dissolved O₂ content and pH value. In cases of H₂S release into coastal shallow waters, CE become a refuge for the hydrobionts inhabiting adjacent ecosystems. Overall, CE play an extremely important role in the preservation of biota and therefore require special protection measures.

Key words: capes, hard substrate, periphytal, abiotic features, northwestern part of the Black Sea.

Вступ

Серед усіх морських прибережних біогеоценозів найбільшою різноманітністю біотопів і біот відрізняються коралові та скелясто-кам'янисті (Briggs, 1995; Veron, 1995; Шуйський, 2000; Протасов, 2011). У прибережній зоні Світового океану з глибинами до 65 м тверді субстрати займають лише 4% площі дна (Hall, 2002).

Котловина Чорного моря формувалась як міжгірська геосинкліналь, що прогиналась між гірськими системами Криму на півночі, Кавказу на сході та Понтійськими горами на півдні. Береги тут скелясто-кам'янисті (Vespremeanu & Golumbeanu, 2018; Bosneagu, 2022). Північно-західна частина Чорного моря (ПЗЧМ) розташована на захід від лінії, яка з'єднує великі кам'янисті миси Тарханкут (Україна) та Каліакра (Болгарія), і на відміну від інших регіонів бідна на кам'янисті субстрати. Тверді субстрати у ПЗЧМ зосереджені переважно у екосистемах мисів, розташованих перпендикулярно до берегової лінії та у грядях випирання, які утворюються при зсувах паралельно берегу. Використовуючи ландшафтно-біотопічний підхід, ми виділяємо у прибережній смузі ПЗЧМ схожі за багатьма ознаками групи екосистем: 1 – мисів, 2 – піщаних заток між мисами, 3 – піщаних пересипів лиманів, 4 – лиманів та лагун, 5 – гирл річок. Серед

них тільки в екосистемах мисів (ЕМ) є великі скупчення різних за розмірами уламків каміння, які смугою простягаються до глибин 8–10 м і височіють над дном на різну висоту. На скупченнях формуються поселення водоростей-макрофітів і двостулкових молюсків, які з одного боку є компонентами біоценозів, а з іншого – є субстратом для різних гідробіонтів. З усіх боків миси оточені пухкими ґрунтами і мають вигляд анклавів. Утворюються миси в ПЗЧМ як результат трансгресії, зсувів, розмиву берегів штормовими хвилями і течіями. Біотопи мисів входять до складу прибережно-шельфового біотопу, а пухких ґрунтів – бенталі. Кам'янисті ділянки мисів знаходяться в динамічному зв'язку з оточуючими пухкими ґрунтами то наступаючи на них, то відступаючи. Між ними утворюються перехідні екотонні зони де є як тверді субстрати, так і плями пухких ґрунтів. Завдяки цьому в ЕМ є умови виживання для представників епіфауни і інфауни. Ми пропонуємо розглядати миси ПЗЧМ як особливий тип екосистем з найбільшим різноманіттям біотопів і біоценозів серед усіх природних прибережних екосистем.

У ПЗЧМ, якщо рухатись с заходу на схід, найбільш примітними є миси: Каліакра, Бурнаський, Санжейський, Великий Фонтан, Малий Фонтан, Ланжерон, Одеський Північний, Дофінівський,

Григорівський, Сичавський, Карабуш, Аджияск, Очаківський, Прибійний та Тарханкут. Миси ПЗЧМ знаходяться на різних стадіях руйнування і на різній відстані один від одного. Для фізичної географії кожний мис це ландшафт, а для екологів це екосистема. Морський берег є контактною зоною «суша – море – атмосфера», а миси є часткою його літоконтура (Зайцев, 2008). У літературних джерелах миси ПЗЧМ, як особливий тип екосистем, раніше не розглядалися. Такий підхід було запропоновано нами у 2017 р. (Vinogradov et al., 2018; Виноградов та ін., 2020).

Метою цієї статті було на підставі аналізу опублікованих даних, фондових матеріалів Інституту морської біології НАН України та багаторічних натурних спостережень узагальнити абіотичні особливості екосистем мисів ПЗЧМ, а також привернути увагу дослідників до їх вивчення.

Об'єкт дослідження – екосистеми мисів.

Актуальність досліджень пов'язана з наростаючим антропогенним впливом на прибережні екосистеми та дефіцитом твердих субстратів (ТС) природного походження у ПЗЧМ. У випадках негативних процесів, які можуть протікати у прилеглих екосистемах, ЕМ стають резерватами для різних видів гідробіонтів, останнім прихистком для рідкісних і зникаючих видів.

Отримана інформація може бути використана при розробці заходів охорони та реконструкції прибережних екосистем перифіталі.

Матеріал та методи

Дослідження ЕМ проводили в Одеському морському регіоні ПЗЧМ у 1991–2021 рр. з травня по жовтень на мисах Великий Фонтан, Малий Фонтан, Ланжерон, Одеський Північний. Головними методами були: візуальні спостереження за допомогою легковололазного спорядження, стандартні визначення прозорості, температури, солоності, вмісту розчинених у воді O_2 , H_2S , величини рН.

Результати та обговорення

Геоморфологічні особливості екосистем мисів

Миси у ПЗЧМ виникають на відкритих ділянках берегів в наслідок дії різних природних чинників – трансгресія, коливання рівня моря, шторми, течії та інші. Кореневі частини мисів складаються із червоних глин, які легко розмиваються, і шарів понтійського вапняку і височіють над рівнем моря на 30–40 м і більше, прикриваючи

миси від північних вітрів. Надводні і підводні частини мисів складаються із великих монолітів, брил, валунів. У підводній частині мисів, крім великих уламків оброблених морем, є скупчення гальки і піску різної крупності. При сильних штормах, дрібні валуни і галька бомбардують великі уламки руйнуючи їх, а пісок їх шліфує. Для представників епіфауни і риб головними якостями великих уламків, як субстратів, є твердість і нерухомість. На глибинах до 2 м сильні шторми знищують майже повністю перифітон. Смути з великих уламків простягаються до глибин 8–10 м, де дія штормів вже малопомітна, але там уламки поступово заносяться пухкими ґрунтами. Великі уламки височують над дном на різну висоту, утворюючи складний рельєф. Між камінням, під камінням і щілинах виникають різні укриття, які використовуються гідробіонтами (Карапеткова і Живков, 2006; Мовчан, 2011).

На рис. 1 і 2 показана узагальнена схема ЕМ при розгляді зверху та збоку. Ми виділяємо кореневу частину, що висунута з кліфу і знаходиться на бенчі; саме тіло мису, що частково знаходиться над і під водою; переферійні (бічні) частини разом з екотонними зонами, та край. До ЕМ відноситься і водна товща.

У зазначеній водній товщі також виділяємо присубстратний шар до 1 м, а на ділянках с глибинами більше 3 м – поверхневий шар завтовшки 2 м. У цих шарах відбуваються зміни деяких важливих для гідробіонтів абіотичних факторів. При глибинах 5–10 м у товщі води в штільову погоду у весняно-літній період може формуватися пікноклін, що ускладнює вертикальне перемішування води і може призводити до гіпоксії і виходу сірководню із пухких опадів.

Вплив абіотичних особливостей ЕМ не обмежується площею зайнятою ними, а поширюється на прилегли екосистеми з пухкими ґрунтами (Begun et al., 2022). Надводні частини мисів створюють вітрові та хвильові тіні, а підводні – гальмують придонні течії, створюють умови для апвелінгу з одного боку, та даунвелінгу з іншого, і таким чином формують трофічні зони і розподіл зообентосу.

Площа підводних частин мисів, наприклад, Каліакра, Констанца, Великий Фонтан, Аджияск, Тарханкут, може становити десятки гектарів. З часом миси руйнуються і пухкі ґрунти повністю їх ховають.

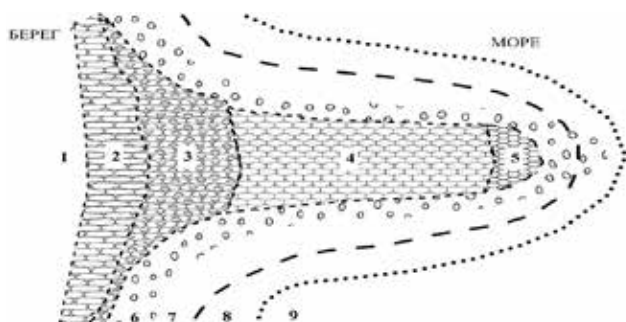


Рис. 1. Узагальнена схема екосистеми розпластаного кам'яного мису (вид зверху): 1 – кліф, 2 – бенч, 3 – надводна частина тіла мису, 4 – підводна частина тіла мису, 5 – край підводної частини, 6 – глибоково-валунно-гальковий пояс, 7 – піщаний, піщано-черепашковий пояс, 8 – мулисто-піщаний пояс, 9 – пояс окислених та неокислених мулів

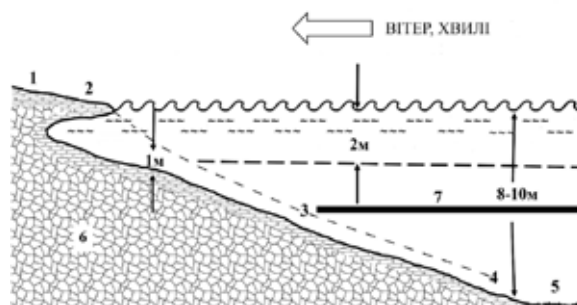


Рис. 2. Узагальнена схема екосистеми розпластаного кам'яного мису (вид збоку): 1 – коренева частина, 2 – надводна частина, 3 – підводна частина, 4 – край підводної частини, 5 – пухкі опади, 6 – тіло мису, 7 – пікноклін, 1 м – присубстратний шар води, 2 м – приповерхневий шар води, 8-10 м – глибина на краю мису

У мисів, які добре збереглися, є більш-менш чітка межа з оточуючими пухкими осадами. Співвідношення площ біотопів ТС та пухких ґрунтів у екосистемах різних мисів і у їх різних частинах можуть значно відрізнятися. Усі миси ПЗЧМ оточені пухкими ґрунтами, роль яких зростає в напрямку бічної периферії мисів і при віддаленні від берега. У міру віддалення від берега в море гранулометричний склад пухких опадів закономірно змінюється від крупно- до дрібнозернистих. Крупний пісок змінюється окисленим мулом, а далі недоокисленим.

Абіотичні особливості мисів

Найбільш важливими абіотичними особливостями середовища, як прибережної периферії, так і бенталі вважаються: характер донних субстратів, тиск (глибина), гідродинаміка, осушка, температура, солоність, освітленість, вміст O_2 , H_2S , величина рН.

Абіотичні відмінності ЕМ стають зрозумілішими при порівнянні їх з екосистемами пухких ґрунтів. О.О. Протасов (2011) порівняв значення головних абіотичних факторів для периферії та бенталі у відсотках від їх суми і показав, що для периферії значення таких чинників як субстрат, температури і світло складають 80 %, а для бенталі – 40%, тому що для бенталі головні фактори – субстрат, тиск (глибина) і кисень.

Спостереження свідчать, що навіть при наявності ТС, але рухомого, усі інші фактори для перифітонних організмів відходять на другий план. Також на нерухомому ТС при низькій гідродинаміці не вини-

кають багатовидові біоценози. На ТС на глибині 8–10 м через низку освітленість в ЕМ майже відсутні водорості-макрофіти і пов'язані з ними безхребетні. На глибині до 10 м зміна тиску не відіграє суттєвої ролі для гідробіонтів ЕМ. Коливання рівня моря в ЕМ можуть сягати 2,0 м, що призводить до осушки частини субстратів. Найбільший вплив штормових хвиль на донні субстрати спостерігається на глибинах від 0 до 5–6 м. На берегоутворюючі процеси в ЕМ діють хвилі і уздовжберегові течії, які викликають міграцію пухких наносів, вирівнювання берегової лінії і рельєфу. Завдяки високій обводненості, пухкі опади під дією гравітації набувають властивість плинності. Сповзання на більшій глибині донних опадів спостерігається у мулів, піску і навіть у більшій фракції. Великі хвилі можуть приводити у рух пухкі опади на глибину до 0,5 м, розкриваючи корінні породи бенча.

Гідродинамічний режим на підводних підняттях дна, якими і є кам'янисті ділянки мисів, завжди активніший ніж на рівному дні. Звичайна гідродинаміка підтримує в ЕМ ряд абіотичних факторів і перш за все концентрацію O_2 на сприятливому для гідробіонтів рівні. Кисень також продукується одноклітинними водоростями і водоростями-макрофітами. Його концентрація в ЕМ коливається від 3,0–4,0 до 15,0–17,0 мг·дм⁻³ (Північно-західна ..., 2006).

Прозорість води та освітленість донних субстратів часто залежить від гідродинаміки. Вона може підвищувати каламутність

і знижувати прозорість майже до нуля. Зазвичай прозорість води в ЕМ становить 1,0–2,0 м, а в тиху погоду і взимку перевищувати 3,0 м. Найбільш сприятливі умови освітлення в ЕМ припадають на глибини до 1,0–1,5 м.

Більшість ЕМ в ПЗЧМ у період паводків на річках знаходяться під впливом опріснення. Однак воно зазвичай охоплює приповерхневий шар води завтовшки до 2–3 м, а в придонному шарі солоність може взагалі не змінюватись. У різні сезони і в екосистемах різних мисів солоність може коливатись від 4,0–5,0 до 17,0–17,5‰ (Північно-західна ..., 2006).

У зимовий період в ЕМ на глибинах до 8–10 м температура води від поверхні до дна може знижуватись до 1–2 °С. У літні місяці на поверхні вода нагрівається до 28° С і більше, але вже на глибині 2 м вона рідка перевищує 22 – 23 °С.

Найбільш загрозу для біот прибережних екосистем ПЗЧМ несе періодичний вихід сірководню на мілководдя. Це явище спостерігається на піщаних ділянках берегів і призводить до масової загибелі безхребетних і риб. Сірководень утворюється в поверхневому шарі (1–2 м) пухких ґрунтів з великою концентрацією органічних речовин. На кам'янистих ділянках мисів він не утворюється і не накопичується. Сірководень надходить у прибережну зону із придонного шару глибоководної частини моря. Кам'янисті біотопи мисів височіють над рівним дном і під дію сірководню не потрапляють.

Величина рН морської води пов'язана з впливом температури, солоності, фотосинтезу, дихання, відкладення у опади іонів буферних систем (в основному карбонатів), газового обміну з атмосферою. Якщо в літку

у всій ПЗЧМ в останні роки величина рН коливається в діапазоні 7,7–9,3, то в ЕМ, завдяки їх абіотичним особливостям, вона зазвичай не перевищує 8,9 і не знижується нижче значення 7,7 (Північно-західна ..., 2006).

Можна констатувати, що не тільки наявність великих площ ТС і різноманіття екологічних ніш, а й більш сприятливі для гідробіонтів гідрологічні та гідрохімічні особливості мисів створюють умови для високого біорізноманіття. Враховуючи вказане, такі оселища потребують особливої охорони (Глумачний ..., 2017; Національний ..., 2018).

Однак, у зв'язку зі збільшеним забрудненням ПЗЧМ пластиком та іншим сміттям антропогенного походження, миси, завдяки своєму розташуванню та складності рельєфу дна, стали для них пастками та накопичувачами.

Висновки

Враховуючи абіотичні відмінності мисів ПЗЧМ від прибережних екосистем пухких ґрунтів їх слід розглядати як особливі екосистеми, які входять до прибережно-шельфового біотопу перифіталі.

В екосистемах мисів складаються і підтримуються на протязі більшості сезонів року найбільш сприятливі умови для виживання прибережних гідробіонтів із різних систематичних груп.

Завдяки абіотичним особливостям екосистем мисів, при виникненні негативних явищ у прилеглих до мисів екосистемах з пухкими ґрунтами, вони можуть ставати природними резерватами для рухомих безхребетних і риб.

Миси відіграють надзвичайно важливу роль у збереженні біот і самі потребують спеціальної охорони.

Список використаної літератури

- Виноградов К.О. Іхтіофауна північно-західної частини Чорного моря. Київ : Вид-во АН УРСР, 1960. 115 с.
- Виноградов О.К., Богатова Ю.І., Синьогуб І.О. Роль портів і судноплавства у формуванні морських біот (неповносолоні моря Європи). Київ : Наукова думка, 2020. 455 с.
- Зайцев Ю.П. Чорноморські береги України. Київ : Академперіодика, 2008. 242 с.
- Карпеткова М., Живков М. Рибите в Болгария. София : Гея-либрие, 2006. 215 с.
- Мовчан Ю.В. Риби України (визначник-довідник). Київ : Золоті ворота, 2011. 420 с.
- Національний каталог біотопів України. Київ: ФОП Клименко Ю.Я., 2018. С. 13–35.
- Протасов А.А. Життя у гідросфері. Нариси із загальної гідробіології. Київ : Академперіодика, 2011. 704 с.
- Північно-західна частина Чорного моря: біологія та екологія. Київ: Наукова думка, 2006. 701 с.
- Глумачний посібник оселищ Резолюції №4 Бернської конвенції, що знаходяться під загрозою і потребують спеціальних заходів охорони (офіційна версія 2015 р.). Київ. 2017. 124 с.

Шуйський Ю.Д. Типи берегів Світового океану. Одеса : Астропринт, 2000. 480 с.

Begun T., Teacă A., Mureşan M., Quijón P. A., Menabit S., Surugiu V. Habitat and macrozoobenthic diversity in marine protected areas of the southern Romanian Black Sea coast. *Front. Mar. Sci.*, 2022. V. 9. P. 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.845507>.

Bosneagu R. Hydrobiological Elements Specific to the Black Sea: Black Sea Ecology /In: The Black Sea from Paleogeography to Modern Navigation. Springer, Cham. 2022. P. 295–315. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-88762-9>.

Briggs J.C. Global Biogeography. Elsevier. 1995. 454 p.

Hall S.J. The continental shelf benthic ecosystem: Current status, agents for change and future prospects. *Environmental conservation*. 2002. 29 (3). P. 350–374. <https://doi.org/10.1017/S0376892902000243>.

Veron J.E.N. Corals in Space & Time. The Biogeography & Evolution of the Scleractinia. Ithaca, London: Cornell University Press (Comstock). 1995. 321 p.

Vespremeanu E., Golumbeanu M. The Black Sea: Physical, Environmental and Historical Perspectives. Springer Geography. Springer, Cham. 2018. 150 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70855-3>.

Vinogradov A.K., Bogatova Y.I., Synegub I.A. Periphytal zone subsystem of the marine ports aquatories. In: Ecology of Marine Ports of the Black and Azov Sea Basin. Springer, Cham. 2018. P. 173–227. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-63062-5>.

References (translated & transliterated)

Vynogradov, K.O. (1960). Ikhtiofauna pivnichno-zakhidnoji chastyny Chornogho morja [Ichthyofauna of the northwestern part of the Black Sea]. Kyiv: Vyd-vo AN URSR [in Ukrainian].

Vynogradov, O.K., Boghatova, Ju.I., & Synjoghub, I.O. (2020). Rolj portiv i sudnoplavstva u formuvanni morsjykh biot (nepovnosoloni morja Jevropy) [The role of ports and shipping in the formation of marine biota (non-saline seas of Europe)]. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].

Zaytsev, Yu.P. (2008). Chernomorskiye berega Ukrainy [Black Sea coast of Ukraine]. Kyiv: Akadempriodika [in Ukrainian].

Karpetkova, M., & Zhyvkov, M. (2006). Rybyte v Bolgharyja [Fish of Bulgaria]. Sofyja: Ghejalybrye [in Bulgarian].

Movchan, Yu.V. (2011). Ryby Ukrainy (vyznachnyk-dovidnyk) [Fishes of Ukraine (reference guide)]. Kyiv: Zoloti vorota [in Ukrainian].

Kuzemko, A.A., Didukh, Ja.P., Onyshhenko, V.A., & Sheffer, Ja. (Eds.). (2018). Nacionalnyj katalog biotopiv Ukrajinny [National catalog of biotopes of Ukraine]. Kyiv: FOP Klymenko Ju.Ja [in Ukrainian].

Protasov, A.A. (2011). Zhyttia u hidrosferi. Narysy iz zahalnoi hidrobiolohii [Life in the hydrosphere. Essays on general hydrobiology]. Kyiv: Akadempriodika [in Ukrainian].

Zaytsev, Yu.P., Aleksandrov, B.G., & Minichtva, G.G. (Eds.). (2006). Pivnichno-zakhidna chastyna Chornoho moria: biolohiia ta ekolohiia [North-Western Part of the Black Sea: Biology and Ecology]. Kyiv: Naukova Dumka [in Ukrainian].

Kuzemko, A., Sadoghursjka, C., & Vasylyjuk, O. (Eds.). (2017). Tlumachnyj posibnyk oselyshh Rezoljuciji № 4 Berns'koho konvenciji, shho znakhodjatsja pid zagrozozu i potrebujutj special'nykh zakhodiv okhorony (oficijna versija 2015 roku) [Interpretive manual of settlements of Resolution № 4 of the Berne Convention, which are under threat and require special protection measures]. Kyiv [in Ukrainian].

Shujskij, Ju.D. (2000). Typy bereghiv Svitovogho okeanu [Types of coasts of the World Ocean]. Odesa: Astroprynt [in Ukrainian].

Begun, T., Teacă, A., Mureşan, M., Quijón, P.A., Menabit, S., & Surugiu, V. (2022). Habitat and macrozoobenthic diversity in marine protected areas of the southern Romanian Black Sea coast. *Front. Mar. Sci.*, 9, 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.845507> [in English].

Bosneagu, R. (2022). Hydrobiological Elements Specific to the Black Sea: Black Sea Ecology /In: The Black Sea from Paleogeography to Modern Navigation. Springer, Cham. P. 295–315. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-88762-9> [in English].

Briggs, J.C. (1995). Global Biogeography. Elsevier. 454 p. [in English].

Hall, S.J. (2002). The continental shelf benthic ecosystem: Current status, agents for change and future prospects. *Environmental conservation*, 29 (3), 350–374. <https://doi.org/10.1017/S0376892902000243> [in English].

Veron, J.E.N. (1995). Corals in Space & Time. The Biogeography & Evolution of the Scleractinia. Ithaca, London: Cornell University Press (Comstok). 321 p. [in English].

Vespremeanu, E., & Golumbeanu, M. (2018). The Black Sea: Physical, Environmental and Historical Perspectives. Springer Geography. Springer, Cham. 150 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70855-3> [in English].

Vinogradov, A.K., Bogatova, Y.I., & Synegub, I.A. (2018). Periphytal zone subsystem of the marine ports aquatories. In: Ecology of Marine Ports of the Black and Azov Sea Basin. Springer, Cham. P. 173–227. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-63062-5> [in English].

Отримано: 26.03.2024

Прийнято: 05.04.2024



УДК 556.532(477-924-52)

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.26>

АЛГОРИТМ ОЦІНЮВАННЯ БАЗОВОГО НАБОРУ ТАКСОНІВ ЗАДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ

О. М. Крайнюков¹, І. А. Кривицька², О. Є. Найдюнова³

Водне середовище часто забруднене складними сумішами хімічних речовин, які можуть становити загрозу для екосистем і здоров'я людини. У зв'язку з нашими обмеженими знаннями про хімічний світ і вплив безлічі неконтрольованих або абсолютно невідомих хімічних речовин порівняння між спостережуваними ефектами та прогнозованою токсичністю на основі хімічного аналізу часто вказує на значні частки незрозумілих ефектів. Оскільки всебічний аналіз і оцінка всього хімічного всесвіту видається неможливим, потрібні підходи, щоб зменшити складність можливого або фактичного забруднення навколишнього середовища, одночасно обмежуючи ймовірність не помічати істотних факторів ризиків і наслідків.

З цим забрудненням неможливо боротися лише за допомогою цільового аналізу, потрібні такі інструменти, щоб зменшити цю складність і визначити небезпечний вплив хімічних речовин, які можуть спричинити несприятливі наслідки. Пов'язати біологічні ефекти з впливом конкретних активних речовин часто проблематично через велику кількість сполук, присутніх у навколишньому середовищі. Біотести, ймовірно, є рішенням для визначення сумісної дії всіх присутніх у воді хімічних речовин та встановлення токсичних властивостей водного середовища і отже благополуччя водної екосистеми.

У лабораторії еколого-токсикологічних досліджень Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна було проведено серію експериментальних досліджень з визначення рівнів гостроти

¹ доктор географічних наук, професор, професор кафедри екологічної безпеки та екологічної освіти (Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Харків)
e-mail: alkraunukov@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5264-3118

² кандидат біологічних наук, доцент кафедри екологічної безпеки та екологічної освіти (Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Харків)
доцент кафедри агрономії та землеустрою (Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Київ)
e-mail: ivkrivicka@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4727-794X

³ кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник, в.о. завідувача сектору мікробіології ґрунтів (Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського», м. Харків)
e-mail: naydyonova@ukr.net
ORCID: 0000-0002-8568-5699

летальної токсичності зразків стічної води, які було відібрано з випусків підприємств різних галузей промисловості у межах Дніпропетровської області та рівнів хронічної токсичності зразків поверхневих вод з контрольних створів тих самих підприємств. В експериментах використовували «базовий набір таксонів», а саме водорості, макрофіти, ракоподібні та риби.

Можливим недоліком визначення екологічного стану водного об'єкту за допомогою біотестування може бути його нереалістичне представлення за допомогою лише одного біотеста, оскільки біологічна реакція організму на один і той самий токсичний агент відрізняється. Тому для дослідження токсичності поверхневих та стічних вод, за результатами цього дослідження, рекомендується використовувати декілька біологічних тестів з організмами, що представляють різні трофічні рівні.

Ключові слова: забруднення, водний об'єкт, тест-об'єкт, параметр, методика біотестування, ефективність.

ALGORITHM FOR ESTIMATING THE BASIC SET OF TAXA FOR DETERMINING THEIR EFFECTIVENESS

O. M. Krainiukov, I. A. Kryvytska, O. E. Naidonova

The aquatic environment is often polluted with complex mixtures of chemicals that can pose a threat to ecosystems and human health. Due to our limited knowledge of the chemical world and exposure to a multitude of uncontrolled or completely unknown chemicals, comparisons between observed effects and predicted toxicity based on chemical analysis often indicate significant fractions of unexplained effects. Because comprehensive analysis and assessment of the entire chemical universe appears impossible, approaches are needed to reduce the complexity of potential or actual environmental contamination while limiting the likelihood of missing significant risk factors and consequences. This pollution cannot be tackled by targeted analysis alone, such tools are needed to reduce this complexity and identify hazardous chemical exposures that may cause adverse effects. It is often problematic to relate biological effects to exposure to specific active substances due to the large number of compounds present in the environment. Bioassays are probably the solution to determine the synergistic effect of all chemicals present in the water and establish the toxic properties of the aquatic environment and therefore the well-being of the aquatic ecosystem.

In the laboratory of ecological and toxicological research of Kharkiv National University named after V. N. Karazin, a series of experimental studies was conducted to determine the levels of acute lethal toxicity of waste water samples, which were selected from the releases of enterprises of various industries within the Dnipropetrovsk region, and the levels of chronic toxicity of surface water samples from control units of the same enterprises. The experiments used a "base set of taxa", namely algae, macrophytes, crustaceans and fish.

A possible disadvantage of determining the ecological status of a water body using biotesting can be its unrealistic representation using only one biotest, since the biological response of an organism to the same toxic agent is different. Therefore, to study the toxicity of surface and wastewater, according to the results of this study, it is recommended to use several biological tests with organisms representing different trophic levels.

Key words: pollution, water object, test object, parameter, biotesting technique, efficiency.

Вступ

Токсичні ефекти, що виявляються в навколишньому середовищі, найчастіше викликані впливом сумішей відомих і невідомих забруднюючих речовин. Однією з ключових проблем у хімії навколишнього середовища та екоотоксикології є характеристика та ідентифікація цих токсикантів у зв'язку з їх небезпечним ефектом. Багато з поточних досліджень з оцінки небезпечної дії забруднювачів у нашому середовищі пов'язані з труднощами в оцінюванні різних ефектів від дії складних сумішей (Schuijt et al., 2021; Lomartire et al., 2021).

Щоб подолати ці аналітичні проблеми, протягом останнього десятиліття з'явилася біоаналітична концепція. Поточні проблеми в оцінці якості води водних об'єктів, яка орієнтована в основному на визначення концентрацій хімічних речовин може призвести до величезних аналітичних витрат, в той час коли впровадження інтегрованих біоаналітичних підходів як багатообіцяючих потужних інструментів може в значній мірі удосконалити та пришвидшити моніторингові дослідження впливу хімічних речовин на водні екосистеми шляхом врахування зв'язку наявність/ефект (Suter, 2008).

Існує величезна невідповідність між кількістю сполук, потенційно присутніх у навколишньому середовищі та кількістю пріоритетних забруднювачів, які регулярно перевіряються. Одна з труднощів, що виникає при оцінюванні забруднення навколишнього середовища, полягає в тому, що існує багато забруднюючих речовин які мають низькі концентрації, які призводять до токсичного ефекту та значну часову та просторову мінливість. Аналіз кількох класів сполук, присутніх у слідових або ультраслідових концентраціях, вимагає використання різного обладнання, методик та алгоритмів і кожен алгоритм передбачає різні методи підготовки зразків. Ці вимоги вимагають багато часу та витрат. Очевидно, що провести хімічний моніторинг усіх сполук, які можуть знаходитися у зразках води практично неможливо і цільовий аналіз попередньо вибраних наборів забруднювачів часто пропускає токсичні речовини, специфічні для конкретного місця і тому іноді дуже складно пояснити токсикологічні властивості зразків води (Hollert et al., 2005).

Крім того, органічні забруднювачі є реактивними сполуками, тобто вступають у хімічні реакції у навколишньому середовищі та водних системах досить швидко. Добре відомі реакції трансформації, які включають фізико-хімічні процеси (гідроліз, реакції, викликані світлом, реакції з окислювачами) та біологічні процеси (з вільними бактеріями чи біоплівкою, або метаболізм). Ці реакції перетворення призводять до утворення численних новітніх хімічних сполук, про які в більшості випадків майже нічого не відомо. Утворення кількох продуктів перетворення, що виникають із-за численних забруднювачів, присутніх у водних системах, збільшує складність проблеми, особливо тому, що деякі з них можуть бути більш стійкими та/або більш токсичними, ніж їхні вихідні сполуки.

Вивчення токсичності, перш за все, органічних забруднювачів ускладнюється труднощами пізнання природи та токсичності продуктів їх перетворення. Зіткнувшись із великою кількістю нових забруднювачів і значно більшою кількістю метаболітів і продуктів розпаду, існує критична нестача надійних даних для оцінки їхніх ризиків для навколишнього середовища та здоров'я людини. Для всіх цих невідомих сполук доступна дуже мізерна інформація про їхні хімічні та біохімічні властивості та їх потенційні взаємодіючі ефекти в складних

сумішах. В даний час зростає занепокоєння щодо утворення продуктів трансформації, оскільки є докази того, що вони можуть бути більш токсичними та стійкими, ніж первісні сполуки (Hernández et al., 2008).

Пов'язати біологічні ефекти з впливом конкретних активних речовин часто проблематично через велику кількість сполук, присутніх у навколишньому середовищі. Біотести, ймовірно, є рішенням для аналізу токсичних властивостей у зразках, але за їх допомогою не можливо ідентифікувати сполуки. У той же час, сучасні хіміко-аналітичні методи забезпечують чудову чутливість при аналізі відомих сполук, але вони не можуть дати інформацію про токсичні властивості і легко пропускають сполуки, які не були включені в конкретний метод кількісного визначення (Houtman et al., 2007). Щоб встановити причинно-наслідкові зв'язки між ефектами, що спостерігаються в навколишньому середовищі та оцінити результати хімічного аналізу, все більше дослідницьких груп почали поєднувати біологічні (переважно біотести) та хімічні методи (Streck et al., 2009).

Постановка проблеми. Однією із найбільш важливих характеристик методик біотестування є чутливість організмів, які використовуються в якості тест-об'єктів, на присутність у середовищі їх мешкання хімічних сполук токсичної дії. Дослідження питань чутливості водних організмів до дії токсичних сполук присвячено певну кількість робіт (Allan et al., 2006; Kadian et al., 2016; Aslantürk et al., 2018; Sabotić et al., 2024). Поняття чутливості організмів має два аспекти – якісний та кількісний. В якісному відношенні чутливість – це здатність функцій організму відповідати на вплив (дію) хімічних сполук. У кількісному відношенні найчастіше чутливість слугує задля зіставлення реактивності різних організмів, функцій і процесів на шкідливий вплив. Організм вважається більш чутливим, ніж інший, якщо порушення його життєвих функцій відбувається раніше та при менших концентраціях впливу або наявності таких порушень виявляється раніше (Martinez-Haro et al., 2022).

При дослідженні дії токсичної сполуки на організм оцінюють його реакцію за одним або декількома заздалегідь встановленими показниками. Якщо досліджується сукупність показників, то, зазвичай, загальна чутливість організму встановлюється по найбільш чутливому з показників (Крайнюков, 2013).

Спроби застосувати якісь обмеження поняття чутливості процесами фізіолого-біохімічного характеру не призводить до отримання правильного та достовірного результату. Практичні дослідження з урахуванням інших функцій життєдіяльності організмів також може використовуватися для оцінки чутливості організму за задалегідь встановленими показниками.

В якості кількісного показника чутливості можливо використовувати, або мінімальну концентрацію токсичної речовини, що викликає зміну будь-якої функції організму за певний термін часу, або мінімальний термін прояву зміни при заданому впливі, або, нарешті, величину відповідної реакції при заданому впливі і терміні, визначеному умовами проведення досліду. У зв'язку з цим, одиницями вимірювання чутливості можуть слугувати одиниці концентрації речовини, часу або одиниці вираження ефекту (відсотки). При вираженні чутливості організму через концентрацію або час задалегідь встановлюється фіксована величина ефекту, яка повинна бути викликана впливом. Найчастіше приймається величина ефекту, що складає мінімальне статистичне достовірне відхилення відповідного показника від контролю (Крайнюков, 2013).

Таким чином, поняття чутливості є відносним, а при кількісній оцінці чутливості функції організму існує необхідність введення обмежуючих умов. З урахуванням цих умов поняття чутливості може бути визначене як найменша величина токсичної дії (концентрація або термін експозиції), що викликає відхилення будь-якого біологічного або екологічного показника від контролю не менш, ніж на деяку обумовлену величину за встановлений термін (Крайнюков, 2013).

Матеріал і методи

Зважаючи на євроінтеграційну спрямованість України також і у водоохоронній діяльності, основна наша увага приділяється Водній Рамковій Директиві 2000/60/ЄС (ВРД), яка встановлює основні нормативні засади охорони поверхневих вод від шкідливого впливу небезпечних хімічних сполук. Відповідно до статті 16 ВРД визначено стратегію відповідно до поводження з хімічними речовинами задля захисту поверхневих водних об'єктів від забруднення.

Відповідно до пункту 1.2.6. Додатку V ВРД 2000/60/ЄС з метою обмеження надходження до поверхневих водних об'єктів небезпечних хімічних речовин встановлю-

ються екологічні стандарти якості води на «базовому наборі таксонів» з використанням представників основних ланок трофічного ланцюга водної екосистеми: водоростей та/або макрофітів, ракоподібних та риб (Крайнюкова та ін., 2021).

Найбільш вживаними у практичних дослідженнях тест-об'єктами для здійснення оцінки небезпеки окремих хімічних речовин, їх сумішей для водної екосистеми та встановлення екологічних стандартів якості води є наступні:

– для водоростей: *Pseudokirchneriella subcapitata*, *Scenedesmus quadricauda*, *Scenedesmus subspicatus*, *Chlorella vulgaris*, *Selenastrum capricornutum*;

– серед ракоподібних: *Ceriodaphnia affinis*, *Ceriodaphnia dubia*, *Daphnia magna*, *Hyalella azteca*;

– серед риб: *Cyprinus carpio*, *Oncorhynchus mykiss*, *Danio rerio*;

– серед макрофітів: *Lemna minor*.

«Базовий набір таксонів» в країнах ЄС використовується для визначення токсичних властивостей нових (штучних) хімічних речовин або сумішей, які розроблені на території країн ЄС або є імпортованими. Зазначені процедури здійснюються відповідно до Регламенту ЄС № 1907/2006 Про реєстрацію, оцінку, авторизацію і обмеження хімічних речовин та препаратів (REACH). Додатками VII-X Регламенту встановлюються обов'язкові вимоги до стандартної інформації нової хімічної речовини необхідної для отримання дозволу на її використання, серед якої для захисту водної екосистеми використовуються результати визначення їх токсикологічних властивостей на водоростях, ракоподібних та рибах (Крайнюкова та ін., 2021).

Результати

Метою цього дослідження було оцінювання різних параметрів методик біотестування для досягнення оптимального кількісного та якісного визначення рівня токсичності будь-якої категорії води та визначення найбільш ефективної методики біотестування.

В лабораторії еколого-токсикологічних досліджень Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна було проведено серію експериментальних досліджень з визначення рівнів гострої летальної токсичності зразків стічної води, які було відібрано з випусків підприємств різних галузей промисловості у межах Дніпропетровської області та рівнів хронічної токсичності зраз-

ків поверхневих вод з контрольних створів тих самих підприємств. В експериментах використовували «базовий набір таксонів», а саме водорості, макрофіти, ракоподібні та риби.

При впровадженні методик біотестування в водоохоронну практику, окрім чутливості тест-об'єктів, важливого значення та оцінки набувають такі різні параметри, як експресність отримання результатів, економічність та трудомісткість токсикологічних аналізів, вірогідність результатів та відповідність вимогам встановлених для них метрологічних характеристик та ін. Враховуючи вищенаведене, для оцінювання ефективності методик біотестування на різних представниках трофічного ланцюга водної екосистеми було використано та апробовано ряд параметрів:

- 1) чутливість: кількість позитивних відповідей на вплив токсичних проб води з числа проаналізованих;
- 2) мінімальна діюча концентрація найбільш токсичної проби води згідно з критерієм токсичності, %;
- 3) експресність: тривалість біотестування, годин;
- 4) трудомісткість: витрати часу на підготовку та проведення біотестування, обчислення результатів, годин;
- 5) економічність: стартові та експлуатаційні витрати (придбання спеціального обладнання, матеріалів, реактивів, культури тест-об'єкта), грн.;
- 6) особливості біотеста (можливість визначення гострої і хронічної токсичності, відсутність суб'єктивізму в оцінюванні тест-реакції) і тест-об'єкта (спосіб отримання та можливість безперервного культивування в лабораторних умовах);

мання та можливість безперервного культивування в лабораторних умовах);

7) наявність метрологічних характеристик: похибки одиночного визначення токсичності, нормативу оперативного контролю відтворюваності результатів, діапазону реагування тест-об'єкта;

8) наявність нормативно-правових документів, національних та міжнародних стандартів;

9) можливість та ефективність використання за умов виробничих і контролюючих лабораторій;

10) розповсюдженість використання в інших країнах.

Як видно із переліка, у параметрах знайшли відображення всі основні характеристики біотестів, об'єктивна оцінка яких надає можливість проранжувати біотести за показником ефективності використання (Крайнюкова та ін., 2021). Оцінювання кожної параметра здійснювалось за 10 бальною шкалою (табл. 1).

Як видно з наведених результатів, найбільш ефективною методикою біотестування, виходячи з аналізу наведеного переліку параметрів – є методика визначення хронічної та гострої летальної токсичності на ракоподібних *Ceriodaphnia affinis* (ДСТУ, 2003). Інші методики можливо використовувати в якості допоміжних для отримання додаткової інформації о токсикологічних властивостях досліджуваних зразків поверхневих та/або зворотних вод.

Обговорення

Біологічна оцінка є обов'язковою для скидів стічних вод в багатьох країнах, тоді як в інших стічні води оцінюються лише за

Таблиця 1
Результати оцінювання ефективності методик біотестування за запропонованими параметрами

№ параметра	<i>Scenedesmus quadricauda</i>	<i>Chlorella vulgaris</i>	<i>Danio rerio</i>	<i>Lemna minor</i>	<i>Ceriodaphnia affinis</i>	<i>Daphnia magna</i>
1.	8	6	2	4	10	9
2.	9	7	2	5	10	9
3.	8	8	7	7	5	5
4.	5	7	5	8	10	10
5.	2	2	2	3	9	9
6.	7	7	7	7	10	10
7.	10	5	10	5	10	10
8.	10	8	10	8	10	10
9.	8	8	7	7	10	10
10.	10	10	10	10	10	10
Σ	77	68	62	64	94	92

їх хімічними та фізичними властивостями. Існує широкий вибір доступних біотестів, але для рутинного скринінгу зворотних (стічних) та поверхневих вод корисною буде батарея швидких невеликих біотестів на різних трофічних рівнях. Найбільш класичними екоотоксикологічними методами тестування стічних та поверхневих вод є стандартні тести на ракоподібних, зелених водоростях та ін., за допомогою яких виявляють гостру та хронічну токсичність. Результати нашого дослідження показали, що найбільш ефективною та «чутливою» є методика біотестування з використанням ракоподібних *Ceriodaphnia affinis*, хоча оцінка не повинна обмежуватися лише одним чи двома біотестами чи лише хімічним аналізом. Для того, щоб отримати всебічне уявлення про біологічні ефекти впливу, слід використовувати різноманітні методи. Батарея швидких дрібномасштабних біотестів для оцінки рівнів гострої та хронічної токсичності, генотоксичності може бути придатною для оцінювання благополуччя водної екосистеми.

Висновки

У результаті серії експериментальних досліджень із визначення рівнів хронічної та гострої летальної токсичності та оцінювання запропонованих параметрів по визначенню найбільш ефективної методики біотестування було встановлено, що методика біотестування з використанням ракоподібних *Ceriodaphnia affinis* є найбільш ефективною. В експериментах використовували «базовий набір таксонів», а саме водорості, макрофіти, ракоподібні та риби.

Можливим недоліком визначення екологічного стану водного об'єкту за допомогою біотестування може бути його нереалістичне представлення за допомогою лише одного біотеста, оскільки біологічна реакція організму на один і той самий токсичний агент відрізняється. Тому для дослідження токсичності поверхневих та стічних вод, за результатами цього дослідження, рекомендується використовувати декілька біологічних тестів з організмами, що представляють різні трофічні рівні.

Список використаної літератури

- ДСТУ 4173-2003. Якість води. Визначання гострої летальної токсичності на *Daphnia magna* Straus та *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg (Cladocera, Crustacea) (ISO 6341:1996, MOD). 17 с.
- Крайнюков О.М. Критерії оцінки чутливості організмів та ефективності методик біотестування для визначення токсичних властивостей води. *Вісник ХНУ. Сер.: Екологія*. 2013. № 1012. С. 64–69.
- Крайнюкова А.М., Крайнюков О.М., Кривицька І. А. Використання методик біотестування для оцінювання екологічного стану поверхневих вод. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна серія «Екологія»*. 2021. 24. С. 103–116. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-24-09>.
- Allan Ian J., Vrana B., Greenwood R., Mills G. A., Roig B., Gonzalez C. A “toolbox” for biological and chemical monitoring requirements for the European Union’s Water Framework Directive. *Talanta*, 2006. Vol. 69. Issue 2. P. 302–322. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2005.09.043>.
- Aslantürk A., Sultan Ö. In vitro cytotoxicity and cell viability assays: principles, advantages, and disadvantages. *Genotoxicity-A predictable risk to our actual world*. 2018. 2. P. 64–80. <https://doi.org/10.5772/intechopen.71923>.
- Hernández F., Sancho J.V., Ibáñez M., Grimalt S. Investigation of pesticide metabolites in food and water by LC-TOF-MS. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2008. Vol. 27. Issue 10. P. 862–872. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2008.08.011>.
- Hollert H., Dürr M., Holtey-Weber, R. Endocrine Disruption of Water and Sediment Extracts in a Non-Radioactive Dot Blot/RNase Protection-Assay Using Isolated Hepatocytes of Rainbow Trout. Deficiencies between bioanalytical effectiveness and chemically determined concentrations and how to explain them. *Env Sci Poll Res Int*. 2005. 12. P. 347–360. <https://doi.org/10.1065/espr2005.07.273>.
- Houtman C.J., Booj P., Van der Valk C.M., Van Bodegom P.M., Van den Ende F., Gerritsen A.A.M., Lamoree M.H., Legler J., Brouwer A. Biomonitoring of estrogenic exposure and identification of responsible compounds in bream from Dutch surface waters. *Environ. Toxicol. Chem*. 2007. 26. P. 898–907. <https://doi.org/10.1897/06-326R.1>.
- Kadian N., Raju K., Rashid M., Malik M., Taneja I., Wahajuddin M. Comparative assessment of bioanalytical method validation guidelines for pharmaceutical industry. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2016. Vol. 126. P. 83–97. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2016.03.052>.

Lomartire S., Marques J.C., Gonçalves A.M.M. Biomarkers based tools to assess environmental and chemical stressors in aquatic systems. *Ecol. Indic.* 2021 122. P. 107207. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107207>.

Martinez-Haro M., Acevedo P., Juliana Pais-Costa A., Neto J. M., Vieira L. R., Ospina-Alvarez N., Taggart M. A., Guilhermino L., Ribeiro R. Ecotoxicological tools in support of the aims of the European Water Framework Directive: A step towards a more holistic ecosystem-based approach. *Ecological Indicators*. 2022. Vol. 145. P. 109645. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109645>.

Sabotić J., Bayram E., Ezra D., Gaudêncio S. P., Haznedaroğlu B. Z., Janež N., A guide to the use of bioassays in exploration of natural resources. *Biotechnology Advances*, 2024. Vol. 71. P. 108307. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2024.108307>.

Schuijt L.M., Peng F.-J., Van den Berg S.J.P., Dingemans M.M.L., Van den Brink P.J. (Eco)toxicological tests for assessing impacts of chemical stress to aquatic ecosystems: Facts, challenges, and future. *Sci. Total Environ.* 2021. 795. P. 148776 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148776>.

Streck G. Chemical and biological analysis of estrogenic, progestagenic and androgenic steroids in the environment. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2009. Vol. 28. Issue 6. P. 635–652. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2009.03.006>.

Suter M.JF. Effect-oriented environmental analysis. *Anal Bioanal Chem.* 2008. 390. P. 1957–1958. <https://doi.org/10.1007/s00216-008-1982-3>.

References (translated & transliterated)

DSTU 4173-2003. Jakistj vody. Vyznachannja ghostroji letaljnoji toksychnosti na Daphnia magna Straus ta *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg (Cladocera, Crustacea) [Water quality. Determination of acute lethal toxicity to Daphnia magna Straus and *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg (Cladocera, Crustacea)] (ISO 6341:1996, MOD). 17 p. [in Ukrainian].

Krajnjukov, O.M. (2013). Kryteriji ocinky chutlyvosti orghanizmiv ta efektyvnosti metodyk biotestuvannja dlja vyznachennja toksychnykh vlastyvostej vody [Criteria for assessing the sensitivity of organisms and the effectiveness of biotesting methods for determining the toxic properties of water]. *Visnyk KhNU. Ser.: Ekologhija* [Bulletin of Kharkiv National University named after V. N. Karazin, series «Ecology»], 1012, 64–69 [in Ukrainian].

Krajnjukova, A.M., Krajnjukov, O.M., & Kryvyckja, I.A. (2021). Vykorystannja metodyk biotestuvannja dlja ocinjuvannja ekologhichnogho stanu poverkhnevnykh vod [The use of biotesting techniques to assess the ecological status of surface waters]. *Visnyk Kharkivskogho nacionalnogho universytetu imeni V. N. Karazina serija «Ekologhija»* [Bulletin of Kharkiv National University named after V. N. Karazin, series «Ecology»], 24, 103–116. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-24-09> [in Ukrainian].

Allan, Ian J., Vrana, B., Greenwood, R., Mills, G.A., Roig, B., & Gonzalez, C. (2006). A «toolbox» for biological and chemical monitoring requirements for the European Union's Water Framework Directive. *Talanta*, Vol. 69, 2, 302–322. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2005.09.043> [in English].

Aslantürk, A., & Sultan, Ö. (2018). In vitro cytotoxicity and cell viability assays: principles, advantages, and disadvantages. *Genotoxicity-A predictable risk to our actual world*. 2, 64–80. <https://doi.org/10.5772/intechopen.71923> [in English].

Hernández, F., Sancho, J.V., Ibáñez, M., & Grimalt, S. (2008). Investigation of pesticide metabolites in food and water by LC-TOF-MS. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 27, 10, 862–872. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2008.08.011> [in English].

Hollert, H., Dürr, M., & Holtey-Weber, R. (2005). Endocrine Disruption of Water and Sediment Extracts in a Non-Radioactive Dot Blot/RNase Protection-Assay Using Isolated Hepatocytes of Rainbow Trout. Deficiencies between bioanalytical effectiveness and chemically determined concentrations and how to explain them. *Env Sci Poll Res Int.*, 12, 347–360. <https://doi.org/10.1065/espr2005.07.273> [in English].

Houtman, C.J., Booj, P., Van der Valk, C.M., Van Bodegom, P.M., Van den Ende, F., Gerritsen, A.A.M., Lamoree, M.H., Legler, J., & Brouwer, A. (2007). Biomonitoring of estrogenic exposure and identification of responsible compounds in bream from Dutch surface waters. *Environ. Toxicol. Chem.*, 26, 898–907. <https://doi.org/10.1897/06-326R.1> [in English].

Kadian, N., Raju, K., Rashid, M., Malik, M., Taneja, I., & Wahajuddin, M. (2016). Comparative assessment of bioanalytical method validation guidelines for pharmaceutical industry. *Journal of*

Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 126, 83–97. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2016.03.052> [in English].

Lomartire, S., Marques, J.C., & Gonçalves, A.M.M. (2021). Biomarkers based tools to assess environmental and chemical stressors in aquatic systems. *Ecol. Indic.*, 122, 107207. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107207> [in English].

Martinez-Haro, M., Acevedo, P., Juliana Pais-Costa, A., Neto, J.M., Vieira, L.R., Ospina-Alvarez, N., Taggart, M.A., Guilhermino, L., & Ribeiro, R. (2022). Ecotoxicological tools in support of the aims of the European Water Framework Directive: A step towards a more holistic ecosystem-based approach. *Ecological Indicators*, 145, 109645. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109645> [in English].

Sabotič, J., Bayram, E., Ezra, D., Gaudêncio, S.P., Haznedaroğlu, B.Z., & Janež, N. (2024). A guide to the use of bioassays in exploration of natural resources. *Biotechnology Advances*, 71, 108307. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2024.108307> [in English].

Schuijt, L.M., Peng, F.-J., Van den Berg, S.J.P., Dingemans, M.M.L., & Van den Brink, P.J. (2021). (Eco)toxicological tests for assessing impacts of chemical stress to aquatic ecosystems: Facts, challenges, and future. *Sci. Total Environ.*, 795, 148776 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148776> [in English].

Streck, G. (2009). Chemical and biological analysis of estrogenic, progestagenic and androgenic steroids in the environment. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 28, 6, 635–652. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2009.03.006> [in English].

Suter, M.JF. (2008). Effect-oriented environmental analysis. *Anal Bioanal Chem.*, 390, 1957–1958. <https://doi.org/10.1007/s00216-008-1982-3> [in English].

Отримано: 18.04.2024
Прийнято: 26.04.2024



УДК 630.43:630.231
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.27>

СТАН МОЛОДНЯКІВ СОСНИ ПРИРОДНОГО ПОХОДЖЕННЯ ПІСЛЯ НИЗОВОЇ ПОЖЕЖИ

Є. Є. Мельник¹, С. Г. Сидоренко², О. Б. Бондар³, Л. О. Бицюра⁴, І. М. Коваль⁵

Дослідження зміни стану соснових молодняків природного походження після низової пожежі є актуальним, адже такі дані суттєво розширяють розуміння постпірогенного поновлення сосни та його якості. Також такі дослідження є теоретичною базою для подальшого вивчення впливу низових пожеж на самосійні соснові ліси та обґрунтування лісгосподарських заходів у них. Природне поновлення відіграє важливу роль у відтворенні та збереженні лісів зелених зон міста, дозволяє формувати більш стійкі насадження. Дані дослідження допомагають оперативно ухва-

¹ кандидат сільськогосподарських наук,
старший науковий співробітник сектору екології лісу
(Український ордена «Знак пошани» науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісо-
меліорації імені Г. М. Висоцького, м. Харків)

e-mail: wudckij@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9821-2751

² кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник,
завідувач сектору екології лісу

(Український ордена «Знак пошани» науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісо-
меліорації імені Г. М. Висоцького, м. Харків)

e-mail: serhii88sido@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5972-0067

³ кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри екології та охорони здоров'я
(Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль)

e-mail: olexandr.bondar91@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3448-8943

⁴ кандидат економічних наук,
завідувач кафедри екології та охорони здоров'я
(Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль)

e-mail: l.bytsyura@wunu.ua

ORCID: 0000-0002-9476-011X

⁵ доктор сільськогосподарських наук,
старший науковий співробітник сектору екології лісу
(Український ордена «Знак пошани» науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісо-
меліорації імені Г. М. Висоцького, м. Харків)

e-mail: Koval_Iryna@ukr.net

ORCID: 0000-0001-6328-1418

лювати рішення щодо проведення санітарних заходів після пожежі на подібних ділянках та забезпечувати збереження пошкоджених вогнем дерев. На території зеленої зони кожне збережене дерево відіграє важливу роль у забезпеченні комфортного життя міського населення та наданню низки екосистемних послуг. Вивчення динаміки стану у подібних за віком, але різних за Класами Крафта (КК) дерев, дозволить аналізувати та прогнозувати можливі економічні та екологічні втрати в результаті впливу низової пожежі.

Метою роботи є встановлення впливу низової пожежі на зміни стану та всихання соснових молодняків природнього походження.

Для аналізу термального впливу від низової пожежі на окремі дерева було використано висоту нагари на стовбурі та «відносну висоту нагари», враховуючи ступінь розвитку кожного конкретного дерева за Класом Крафта. Для кожного дерева заміряли основні таксаційні показники: діаметр, висоту і санітарний стан. Виявлено основні ознаки пошкодження вогнем, проведено їх оцінку та зміни через кілька місяців після пожежі. За допомогою кореляційного аналізу визначено ступінь і напрямок зв'язку між погіршенням стану деревостану та збільшенням частки всихання дерев. Для визначення впливу пожежі було виміряно та порівняно 59 дерев на площі 0,0021 га. Чисті соснові молодняки на ПП (пробна площа) мають вік 10 років та зростають в умовах свіжого субору (B_2), але при цьому перебувають у різному ступені розвитку в результаті природньої диференціації.

Встановлено, що найбільш сильно постраждали відсталі у рості та розвитку дерева (IV та V КК). У даному випадку всихання відбулося майже повністю (від 80 до 100%), навіть за мінімальних пошкоджень вогнем. Таким чином низова пожежа прискорила процес природного зрідження у сосновому молодняку. На противагу цьому аналіз зміни післяпожежного стану домінуючих і судомінатних дерев (I та II КК) виявив їх більшу стійкість до пошкодження та може бути використано для раціонального планування лісгосподарських заходів. Порівняння цієї ділянки з контрольною не пошкодженою пробною площею засвідчило, що на контролі навіть сильно відсталі у рості та розвитку дерева (IV та V КК) мають санітарний стан в основному на рівні «сильно ослаблені».

Дані дослідження зміни стану та всихання допомогли встановити чіткі кореляційні залежності зміни даних показників від «відносного нагару», внаслідок весняної низової пожежі.

Ключові слова: лісова пожежа, *Pinus Silvestris L.*, вплив поверхневої пожежі, зелена зона, післяпожежні наслідки.

FOREST HEALTH DYNAMICS IN DAMAGED BY SURFACE FIRE YOUNG PINE STANDS THAT HAVE NATURAL ORIGIN

Ye. Ye. Melnyk, S. H. Sydorenko, O. B. Bondar, L. O. Bytsiura, I. M. Koval

The study of trees health changes in after a surface fire is relevant, because such data will significantly expand the understanding of post-pyrogenic growth and development of pine's natural regeneration and its quality. In addition, such studies are forming a theoretical basis for further study of the impact of surface fires on pine forests and justification of forestry treatments in such stands. Natural regeneration plays an important role in the reproduction and preservation of the forests of the city's green areas, allowing for the formation of more sustainable plantations. These researches help to make management decisions about carrying out forestry treatments after a fire (such as salvage logging) and to ensure the preservation of fire-damaged trees. On the territory of the green zone, each preserved tree plays an important role in ensuring the comfortable life of the urban population and providing a number of ecosystem services. The study of the dynamics of the sanitary condition of trees similar in age, but different in Kraft Classes (KC), will allow to better forecast possible economic and ecological losses as a result of the post-fire tree mortality.

The aim of the work is to determine the effect of surface fire on changes in the health condition and post-fire mortality of young pines with the natural origin.

To analyze the effect of thermal impact from the surface fire on individual trees, char height on the trunk and "relative char height", were taking into account as well as the degree of development of each particular tree according to the Kraft Class. For each tree, the main forestry indicators were measured: diameter, height and sanitary condition. The main signs of fire damage were identified, their assessment and changes were carried out several months after the fire. Correlation analysis shows that the tree mortality had significant positive relation with char height and a negative one with tree size (DBH and KC). To determine the impact of the fire, trees on an sampling plot were measured and compared.

Pure pine stand on sampling plots (damaged and control) were 10 years old and grow in B_2 soil conditions.

It has been established that the most severely affected were trees with retardation in the growth and development (IV and V KC). In this case, tree mortality reached 80 to 100%, even with minimal fire damage. In this way, the surface fire accelerated the process of natural liquefaction in young pine trees. In contrast, the analysis of the post-fire forest health changes of dominant and co-dominant trees (I and II KC) revealed their greater resistance to damage and can be used for rational planning of forestry activities. A comparison of this area with the control (undamaged) sampling plot proved that even severely retarded trees in growth and development (IV and V KC) have a sanitary condition mainly at the level of "severely weakened".

Data from the study of changes in state and drying helped to establish clear correlational dependences of the change of these indicators on "relative soot" because of a spring lowland fire.

Key words: forest fire, *Pinus Silvestris L.*, surface fire impact, green zone, post fire mortality.

Вступ

Ліси у межах зелених зон великих міст відіграють в першу чергу важливу роль у забезпеченні цілої низки екосистемних та рекреаційних послуг (Мішенін і Олійник, 2010), тобто беруть на себе такі функції як очищення повітря та води, регулювання кліматичних процесів, вони мають ґрунтозахисне та водоохоронне значення та є місцем відпочинку для міського населення (Симбурова & Barton, 2020; Emily et al., 2020; Lin et al., 2021). Тому в зелених зонах охорона та збереження фактично кожного дерева у лісі має в першу чергу екологічну та соціальну значимість. Основною особливістю лісу є те, що він складається з великої сукупності деревних рослин, які досить щільно розташовані на площі і тісно взаємодіють між собою (Олійник і Вітер, 2011). Це в свою чергу призводить до активізації процесів боротьби за існування та природний добір вже починаючи з молодого віку. У конкурванні з іншими деревами у насадженні, в першу чергу виживають деревні рослини з кращою спадковістю, та ті які потрапили в найбільш сприятливі умови (Швиденко і Остапенко, 2001; Олійник і Вітер, 2011). Вплив антропогенних та природних чинників здатний суттєво прискорити або сповільнити ці процеси. Одним із таких чинників є лісові пожежі низові пожежі, вплив яких проявляється у швидкому погіршенні санітарного стану дерев або повної загибелі насаджень (Menges & Deyrup, 2001; Ворон та ін., 2021).

У наших дослідженнях зроблено порівняння та встановлено особливості впливу вогню та його наслідків для молодих соснових лісів природнього походження.

Подібні дослідження вже проводилися для соснових молодняків у лісах зеленої зони міста Харків, але в основі є вивчення впливу на молоді насадження штучного походження, що зазвичай є в більш сприятливих

умовах для росту та розвитку через певні схеми посадки та систематичні прорідження (Гордієнко і Гузь, 2005). Вже тоді було доведено наскільки сильно впливає пожежа на молоді насадження та призводить до помітної дефоліації та дехромації крони, але при цьому виявлено закономірності які саме дерева та за яких пошкоджень мають найбільше шансів на збереження та відновлення як одразу після пожежі, так і через період в кілька років (Ворон та ін., 2013; Коваль та ін., 2018; Sydorenko et al., 2021).

Матеріал і методи

На території лісового урочища зеленої зони міста Кременчук закладено ділянка площею 0,0021 га після пошкодження весняною низовою пожежею у 2023 році. Схема-карта розташування досліджуваної ділянки та її GPS координати і площа ділянки (49°06'36.4»N 33°23'48.4»E) показано на рис 1.

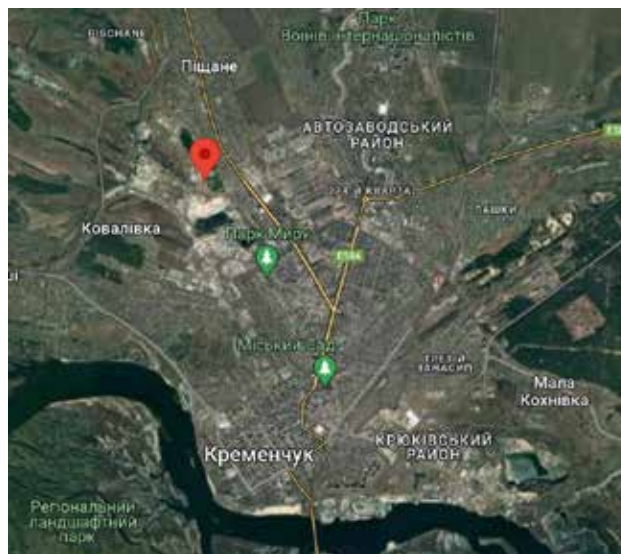


Рис. 1. Схема-карта розташування досліджуваної ділянки у межах зеленої зони міста Кременчук та GPS координати (49°06'36.4»N 33°23'48.4»E) (Google Maps)

Основні таксаційні показники дерев визначено згідно стандартних таксаційних методів (Гром, 2010; Ворон та ін., 2021). Діаметр стовбура виміряно на висоті грудей дерева за допомогою мірної вилки, висота дерева за допомогою висотоміра Анучіна. Виміряно ширину крони та частку живої хвої, а також встановлено відсоток дехромації крони (%) та дефоліації (втрата хвої крони, %). Після цього отримані значення були введені у програму Excel та пораховано середні арифметичні значення.

Стан дерев оцінювали відповідно до рекомендацій УкрНДІАГА (Ворон та ін., 2021) за візуальними ознаками, при цьому враховуючи особливості впливу негативних факторів (Ворон, 2011; Ворон та ін., 2021). Основними ознаками для визначення стану було такі наслідки пошкодження як дефоліація (втрата хвої та листя), а також дехромація (зміна кольору) крон дерев. Ці показники покладено в основу визначення нами ступеня пошкодження досліджуваних деревостанів, що характеризується індексом санітарного стану Іс.

Для порівняння різного ступеня впливу вогню у результаті пожеж та зміни стану у різних групах дерев за Класом Крафта використано середньозважений показник Іс. Його визначають за формулою (1):

$$I_c = \frac{K_1 \cdot n_1 + K_2 \cdot n_2 + \dots + K_6 \cdot n_6}{N}, \quad (1)$$

де Іс – індекс стану деревостану;

$K_1 \dots K_6$ – категорія стану дерев (від I до VI);

$n_1 \dots n_6$ – кількість дерев даної категорії стану;

N – загальна кількість врахованих на ПП дерев.

Для діагностики пошкодження кожного дерева визначено висоту нагару на стовбурі. На основі даного значення розраховано такий показник як «Відносна висота пошкодження», тобто відношення висоти нагару до висоти дерева за формулою 2 (Ворон та ін., 2021).

$$H_{\text{відн.}} = (H_{\text{наг.}} / H_{\text{дер.}}) 100 \%, \quad (2)$$

де $H_{\text{дер.}}$ – висота дерева, м;

$H_{\text{наг.}}$ – середня висота нагару на дереві, м.

Для виявлення закономірностей зміни стану та всихання виконано кореляційний аналіз для встановлення зв'язку між зміною стану дерев та ступенями пошкодження.

Відомо, що вже в молодому віці, у процесі змикання крон дерев, починається взаємне витіснення, конкуренція, боротьба за

життєвий простір (Гордієнко і Гузь, 2005; Олійник і Вітер, 2011). Так і на досліджуваній нами ділянці одні дерева були більш розвинуті та характеризувалися значно кращим ростом, інші були помітно відсталіші в рості і виглядали сильно ослабленими. У зв'язку з цими відмінностями проведено порівняння дерев не лише за основним таксаційними ознаками, але й згідно класифікації німецького лісівника Густава Крафта, що була розроблена у 1884 р. (Олійник і Вітер, 2011). За цією класифікацією всі дерева об'єднано у певні групи, основними ознаками для віднесення дерев до тієї чи іншої групи, слугують характер крони, відносна висота (ріст) дерева, його становище серед сусідніх дерев. Користуючись наведеними ознаками, Крафт поділив всі дерева на 5 класів. Перші три класи (I «предомінуючі», II-«домінуючі», III-«субдомінуючі, тобто помірно розвинуті дерева») відносяться до першої групи, останні два (IV «пригнічені дерева, з ослабленим ростом, але ще життєдіяльні» і V «відмираючі та мертві дерева») – до другої групи. Саме таке порівняння проведено і в нашій роботі та встановлено наскільки негативно відреагували на пошкодження вогнем різної інтенсивності дерева того чи іншого класу Крафта.

Результати та обговорення

Досліджувані дерева природнього походження знаходилися під материнським пологом лише частково. Фактично середньовікові дерева затіняли лише частину пробної площі – з південо-західного напрямку. Тому спостерігається не рівномірний ступінь розвитку подібних за віком дерев (рис. 2).

Для досліджень впливу пожежі було виміряно та порівняно 59 дерев зростаючих на відносно невеликій ділянці площею 0,0021 га. Досліджені молодняки представляють собою чисті одновікові соснові (10С) насадження, що ростуть у природних умовах свіжого субору (B_2), але мають різний ступінь розвитку в результаті природньої конкуренції (Класи Крафта).

На фото (див. рис. 2) також помітні відмінності у наслідках впливу вогню одразу після пожеж (пожовтіння хвої через процес дехромації) та вже через значний період, понад один рік – втрата значної частини хвої та всихання частини дерев.

Основні таксаційні показники та розподіл дерев за категоріями стану досліджуваної ділянки приведено в таблиці 1. Середній діаметр дерев (D сер) на досліджуваній ділянці склав – 3,7 см, а середня висота (H



Через кілька днів після пожежі 11.04.2023



Через рік після пожежі 01.03.2024

Рис. 2. Результати впливу вогню на зміни стану дерев (дефоліація та дехромація) в різні періоди після пожежі

сер) – 2,5 м, при цьому показник по середній висоті нагару досить високий 0,65 м, тобто пожежу можна вважати середньої інтенсивності.

Розподіл дерев за категоріями стану одразу після пожежі показав, що основна частина дерев відносилася до 4 категорії стану (Всихаючі), що виражалася у помітному пожовтінні хвої (див. рис. 2 та табл. 1).

Так, найбільш сильно пошкоджені відсталі у рості та розвитку дерева (IV та V КК), практично всі загинули внаслідок пожежі (від 80 до 100%). Тобто в більшості випадків мало місце повне всихання дерев навіть за мінімальних пошкоджень вогнем. Варто зазначити, що процес всихання дерев цієї групи є природним та він відбувся б у подальші роки в результаті природного зрідження. Аналіз зміни післяпожежного стану доміантних дерев може бути використано для кращого планування лісогосподарських заходів в подібних соснових насадженнях після впливу низової пожежі, адже за результатами наших досліджень вони є більш стійкими до впливу пожежі.

На наступний рік після пошкодження пожежею встановлено залежність всихання

від такої величини пошкодження стовбура дерева як «відносного нагару». Виявлено, що при показнику більшому за 20% значна частина дерев вже має серйозні пошкодження, що ведуть до всихання (5 КС). Критичним рівнем такого пошкодження стовбура є показник 40% і більше, фактично при цьому рівні пошкодження всі дерева віднесено до свіжого (5 КС) та старого сухостою (6 КС) (рис. 3).

У результаті порівняння середніх показників зміни стану дерев (Iс) та середньозваженої частки всихання дерев в залежності від відносної висоти нагару (Дефоліація та Дехромація) для груп дерев з різним ступенем пошкодження встановлено, ще більш тісні кореляційні залежності як зміни стану ($R^2=0.93$) (рис. 4) так і відсотку всихаючих дерев ($R^2=0.90$) (рис. 5) від величини «відносного нагару» на стовбурі. Також визначено критичні значення ступеня пошкодження вогнем за рахунок даного показника, при яких наслідки впливу вогню призводять до повної загибелі дерев, тобто при пошкодженнях більше 40% стовбура.

Аналіз середніх індексів стану Iс та відсотку всихання для груп дерев різних за Класом

Таблиця 1

Основні таксаційні показники деревостану досліджуваної ділянки та розподіл за категоріями стану через різний період після пожежі

D сер	H сер	H наг. сер	Iс	Дата заміру	Категорії стану					
					1	2	3	4	5	6
3,7	2,54	0,65	4,26	11.04.23	0,0	3,4	30,1	41,2	22,5	2,8
				04.03.24	0,0	3,4	32,2	11,9	30,5	22,0

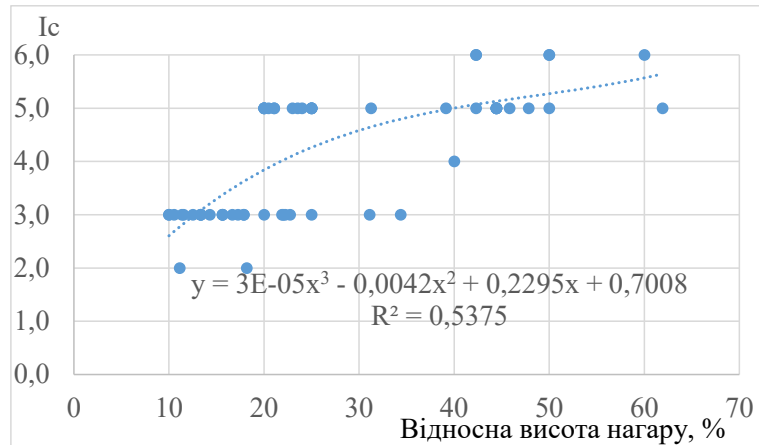


Рис. 3. Індекс стану окремих дерев на досліджуваній ділянці при різному ступені пошкодження вогнем (в залежності від відносної висоти нагару)

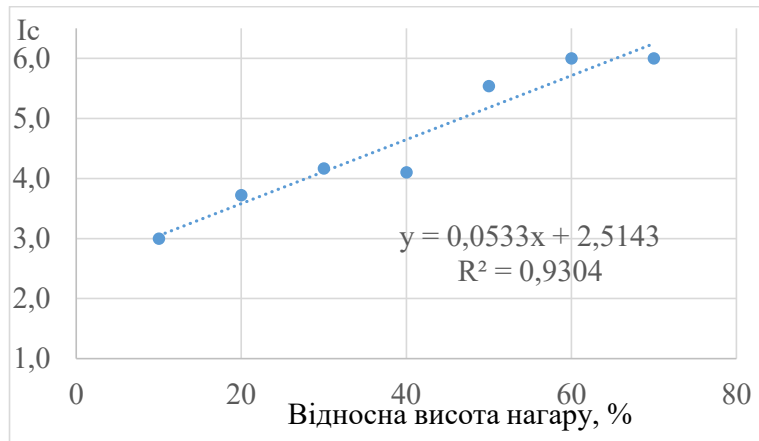


Рис. 4. Середні зміни стану дерев (Ic) в залежності від відносної висоти нагару для груп дерев з різним ступенем пошкодження (Н відн)

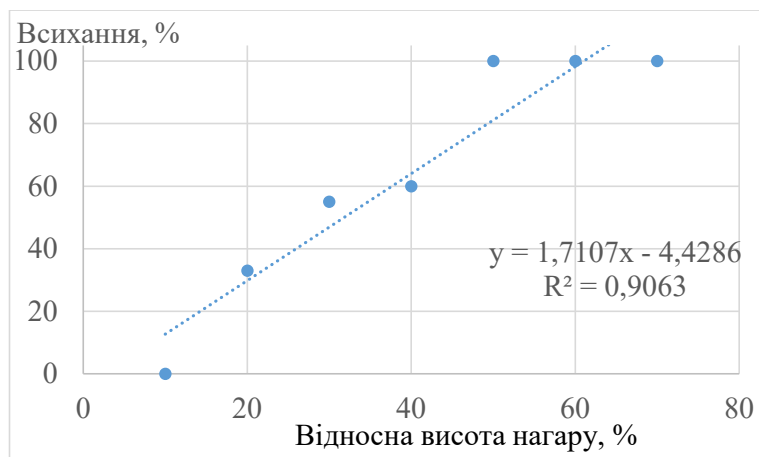


Рис. 5. Середній відсоток всихання в залежності від відносної висоти нагару для груп дерев з різним ступенем пошкодження (Н відн)

Крафта, виявив, що фактично за низових пожеж середньої інтенсивності (навіть до 1,5 м) відсталі у рості та розвитку дерева фактично не мають шансів на виживання (рис. 6). Навіть дерева третьої категорії КК (помірно розвинуті дерева «субдомінуючі»)

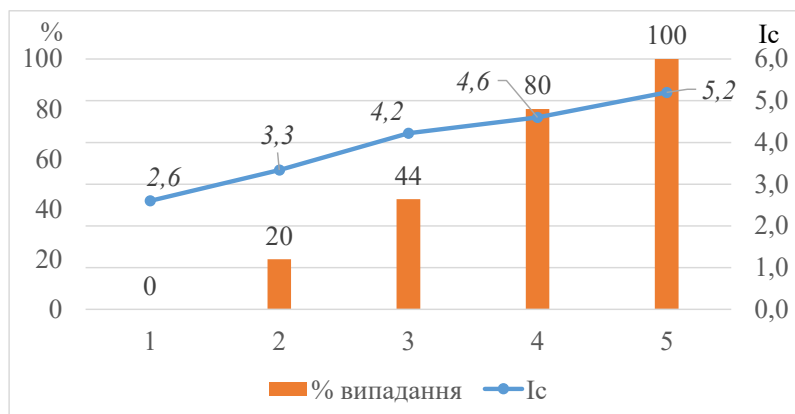


Рис. 6. Середній Iс та частка всихання для груп дерев різних за Класом Крафта

сильно постраждали через пошкодження низовою пожежею середньої інтенсивності ($H_{\text{нар}} 0,65$ м) та мають Iс стану – 4,2 з часткою всихання майже 44%. Лише добре розвинуті дерева I та II КК «предомінуючі» та «домінуючі» мали Iс від 2,6 до 3,3, тобто і найбільші шанси на подальший ріст та розвиток. Але при цьому для дерев II КК всихання склало 20%. Лише серед дерев I КК не відмічено загибелі жодного з дерев, а санітарний стан був у межах 2–3 категорії. Загальна кількість «предомінуючих» та «домінуючих» дерев на досліджуваній ділянці була незначною. Така інформація може бути корисна не лише у призначенні після пожежних санітарних заходів, але й у правильному плануванні можливих контрольованих палів у майбутньому.

Висновки

Встановлено, що найбільш сильно постраждали відсталі у рості та розвитку дерева (IV та V КК). У даному випадку всихання відбулося майже повністю (80–100%),

навіть за мінімальних пошкоджень вогнем. Таким чином низова пожежа прискорила процес природного зрідження у сосновому молодняку. На противагу цьому аналіз зміни післяпожежного стану домінуючих і судомінуючих дерев (I та II КК) виявив їх більшу стійкість до пошкодження. Саме це може бути використано для раціонального планування лісгосподарських заходів в подібних насадженнях. Порівняння цієї ділянки з контрольною не пошкодженою пробною площею засвідчило, що на контролі навіть сильно відсталі у рості та розвитку дерева IV КК мають задовільний санітарний стан, а дерева V КК в основному ще живі.

Перспективи подальших досліджень впливу пожеж на стан соснових молодняків природного походження та вивчення їх подальшого росту та розвитку залишається актуальною проблемою. У подальшому планується розширити дослідження на ділянки самосійних хвойних лісів та впливу низових пожеж на їх стан та розвиток.

Список використаної літератури

- Ворон В.П., Сидоренко С.Г., Мельник Є.Є. Динаміка стану соснових молодняків після низової пожежі. *Лісівництво і агролісомеліорація* 2013. Вип. 123. С. 170–177.
- Ворон В.П., Коваль І.М., Сидоренко С.Г., Мельник Є.Є., Ткач О.М., Борисенко В.Г., Тимошук І.В., Бологов О.Ю. Пірогенна трансформація лісів України. Харків: ТОВ Планет-Прінт, 2021. 286 с.
- Ворон В.П. Наукові основи діагностики антропогенного пошкодження лісових екосистем. *Лісовий журнал*. 2011. № 1. С. 24–28.
- Гордієнко М.І., Гузь М.М., Дебринюк Ю.М., Маурер В.М. Лісові культури. Львів: Камула, 2005. 608 с.
- Гром М.М. Лісова таксація: підруч. для студ. вищ. навч. закладів. Львів: РВВ НАТУ, 2010. 416 с.
- Коваль І. М., Сидоренко С. Г., Невмивака М. О. Післяпірогенний розвиток молодого соснового насадження в Лісостепу. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2018. Вип. 30. С. 123–129.

- Мішенін Є.В., Олійник Н.В. Розвиток ринку екосистемних послуг як напрямок посткризового зростання економіки України. *Механізм регулювання економіки*. 2010. № 3. Т.3. С. 104–116.
- Олійник В.С., Вітер Р.М.. Лісознавство: курс лекцій. Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2011. 264 с.
- Швиденко А.Й., Остапенко Б.Ф. Лісознавство: підручник. Чернівці: Зелена Буковина, 2001. 352 с.
- Cimburova Z., Barton D.N. The potential of geospatial analysis and Bayesian networksto enable i-Tree Eco assessment of existing tree inventories. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020. Vol. 55. 126801. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126801>.
- Emily R., Francesco P., Basu A.S., Basu B. Investigating the effect of trees on urban quality in Dublin by combining air monitoring with i-Tree Eco model. *Sustainable Cities and Society*, 2020. Vol. 61. 102356, P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102356>.
- Google Maps [Електронний ресурс] URL: <https://maps.app.goo.gl/Wyw1JsLZaYTCuhVt9> (дата звернення 10.03.2024).
- Lin J., Kroll C.N., Nowak D.J. An uncertainty framework for i-Tree eco: A comparative study of 15 cities across the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2021. Vol. 60. 127062. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127062>.
- Sydorenko S., Voron V., Koval I., Sydorenko S., Rumiantsev M., Hurzhii R.. Postfire tree mortality and fire resistance patterns in pine forests of Ukraine. *Central European Forestry Journal*. 2021. Vol. 67. P. 21–29. <https://doi.org/10.2478/forj-2020-0029>.
- Menges E. S., Deyrup M. A. Postfire survival in south Florida slash pine: interacting effects of fire intensity, fire season, vegetation, burn size, and bark beetles. *International Journal of Wildland Fire*. 2001. Vol. 10 № 1. P. 53–63 <https://doi.org/10.1071/WF01009>.

References (translated & transliterated)

- Voron, V.P., Sydorenko, S.H. & Melnyk, Ye.Ye. (2013). Dynamika stanu sosnovykh molodniakiv pislia nyzovoi pozhezhi [Dynamics of the state of young pines after a lowland fire]. *Lisivnytstvo i ahrolisomelioratsiia [Forestry and Forest Melioration]*, 123, 170–177 [in Ukrainian].
- Voron, V.P., Koval, I.M., Sydorenko, S.H., Melnyk, Ye.Ye., Tkach, O.M., Borysenko, V.H., Tymoshchuk, I.V., & Bolohov, O.Yu. (2021). Pirohenna transformatsiia lisiv Ukrainy [Pyrogenic transformation of forests of Ukraine]. Kharkiv: TOV Planet-Print [in Ukrainian].
- Voron, V.P. (2011). Naukovi osnovy diahnozyky antropohennoho poshkodzhennia lisovykh ekosystem [Scientific base of diagnostics of anthropogenic damage of forest ecosystems]. *Lisovyi zhurnal [Forestry Journal]*, 1, 24–28 [in Ukrainian].
- Hordiienko, M.I., Huz, M.M., Debryniuk, Yu.M., & Maurer, V.M. (2005). Lisovi kultury [Forest crops]. Lviv: Kamula [in Ukrainian].
- Hrom, M.M. (2010). Lisova taksatsiia: pidruch. [Forest Taxation]. Lviv: RVV NLTU [in Ukrainian].
- Koval, I.M., Sydorenko, S.H., & Nevmyvaka, M.O. (2018). Pislipirohennyi rozvytok molodoho sosnovoho nasadzhennia v Lisostepu [Postpyrogenic development of young pine stand in Forest-steppe]. *Liudyna ta dovkillia. Problemy neoekologii [Man and Environment. Issues of Neoecology]*, 30, 123–129 [in Ukrainian].
- Mishenin, Ye.V., & Oliinyk, N.V. (2010). Rozvytok rynku ekosystemnykh posluh yak napriamok postkryzovoho zrostannia ekonomiky Ukrainy [The development of the ecosystem services market as a direction of the post-crisis growth of the Ukrainian economy]. *Mekhanizm rehuliuвання ekonomiky [Mechanism of Economic Regulation]*, 3 (3), 104–116 [in Ukrainian].
- Oliinyk, V.S., & Viter, R.M. (2011). Lisoznavstvo: kurs lektsii [Forestry: Lecture course]. Ivano-Frankivsk: Symfoniia forte [in Ukrainian].
- Shvydenko, A.I., & Ostapenko, B.F. (2001). Lisoznavstvo: Pidruchnyk [Forestry: textbook]. Chernivtsi: Zelena Bukovyna [in Ukrainian].
- Cimburova, Z., & Barton, D.N. (2020). The potential of geospatial analysis and Bayesian networksto enable i-Tree Eco assessment of existing tree inventories. *Urban Forestry & Urban Greening*, 55, 126801, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126801> [in English].
- Emily, R., Francesco, P., Basu, A.S., & Basu, B. (2020). Investigating the effect of trees on urban quality in Dublin by combining air monitoring with i-Tree Eco model. *Sustainable Cities and Society*, 61, 102356, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102356> [in English].
- Google Maps [Electronic resource] URL: <https://maps.app.goo.gl/Wyw1JsLZaYTCuhVt9> (access date 10.03.2024) [in English].

Lin, J., Kroll, C.N., & Nowak, D.J. (2021). An uncertainty framework for i-Tree eco: A comparative study of 15 cities across the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 60, 127062, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127062> [in English].

Sydorenko, S., Voron, V., Koval, I., Sydorenko, S., Rumiantsev, M., & Hurzhii, R. (2021). Postfire tree mortality and fire resistance patterns in pine forests of Ukraine, 2021. *Central European Forestry Journal*, 67, 21–29. <https://doi.org/10.2478/forj-2020-0029> [in English].

Menges, E.S., & Deyrup, M.A. (2001). Postfire survival in south Florida slash pine: interacting effects of fire intensity, fire season, vegetation, burn size, and bark beetles. *International Journal of Wildland Fire*, 10 (1), 53–63. <https://doi.org/10.1071/WF01009> [in English].

Отримано: 15.04.2024
Прийнято: 23.04.2024



УДК 502.3/.7+504

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.28>

ІННОВАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНОГО УПРАВЛІННЯ АВТОТРАНСПОРТНОЮ СИСТЕМОЮ УРБООКОСИСТЕМ З МЕТОЮ ЗНИЖЕННЯ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА АТМОСФЕРУ

А. В. Пасенко¹, І. О. Солошич²

Особливістю сучасного вирішення екологічних проблем у рамках інноваційного підходу є комплексність із впровадженням зелених технологій у виробництво автомобілів, розвитком інтелектуальних систем управління транспортними потоками. Метою роботи було проведення аналізу інновацій екологічного управління автотранспортною системою урбоекосистем для зниження техногенного навантаження на атмосферу. У дослідженні використано порівняльний аналіз даних щодо інноваційного екологічного управління автотранспортною системою урбоекосистем, який дозволив вивчити динаміку змін параметрів забруднення атмосфери на території Полтавської області та визначено структуру автотранспортного парку міста Кременчука. Переважаючими джерелами забруднення атмосфери на території Полтавської області є викиди пересувних джерел, що становлять 62,7 % від загальнорічних обсягів. Занепокоєння екологів викликає значна частка парникових газів у викидах, при цьому м. Кременчук посідає одне з перших місць за обсягами цих газів. Загальний рівень забруднення приземного шару атмосферного повітря м. Кременчук характеризується як високий. У роботі запропоновано практичні заходи та рекомендації щодо зниження техногенного навантаження на атмосферне повітря в урбоекосистемах, які можуть бути інструментом для прийняття рішень у сфері екологічного управління та транспортної політики. Наукова новизна та практична цінність роботи полягають у розробці інноваційних підходів до екологічного управління, що спрямовані на зниження забруднення атмосферного повітря міських агломерацій та включають перехід до екологічно безпечної логістичної мережі, впровадження екологічних видів палива та збільшення використання екологічно чистих видів транспорту на електроживленні. Запропонована у роботі низка екологічно-управлінських заходів сприятиме зниженню рівню забруднення атмосферного повітря урбоекосистем та посилюватиме актуалізацію пріоритетних заходів з охорони повітря на міському рівні управлінських структур адміністративного корпусу територіальних громад.

¹ кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри екології та біотехнологій
(Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук)
e-mail: pasenko2000@ukr.net
ORCID: 0000-0003-1108-0408

² доктор педагогічних наук, професор,
професор кафедри екології та біотехнологій
(Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук)
e-mail: soloishych@gmail.com
ORCID: 0000-0002-8842-5120

Ключові слова: екологія, атмосфера, урбоєкосистема, автотранспорт, техногенне навантаження, забруднення, інновація, екологічне управління.

INNOVATIONS IN ECOLOGICAL MANAGEMENT OF THE AUTOMOTIVE TRANSPORT SYSTEM IN URBAN ECOSYSTEMS WITH THE AIM OF REDUCING ANTHROPOGENIC LOAD ON THE ATMOSPHERE

A. V. Pasenko, I. O. Soloshych

A feature of the modern solution of environmental problems within the framework of an innovative approach is the complexity with the introduction of green technologies in the production of cars, the development of intelligent systems for managing traffic flows. The purpose of the work was to analyze innovations in the environmental management of the motor vehicle system of urboecosystems to reduce the man-made load on the atmosphere. The research used a comparative analysis of data on the innovative ecological management of the motor vehicle system of urboecosystems, which allowed to study the dynamics of changes in the parameters of atmospheric pollution in the territory of Poltava region and determined the structure of the motor vehicle fleet of the city of Kremenchuk. The predominant sources of atmospheric pollution in the Poltava region are emissions from mobile sources, which make up 62.7% of the total annual volume. Environmentalists are concerned about the significant share of greenhouse gases in emissions, while Kremenchuk occupies one of the first places in terms of the volume of these gases. The general level of pollution of the surface layer of atmospheric air in the city of Kremenchuk is characterized as high. The work offers practical measures and recommendations for reducing the man-made load on atmospheric air in urban ecosystems, which can be a tool for decision-making in the field of environmental management and transport policy. The scientific novelty and practical value of the work lie in the development of innovative approaches to environmental management aimed at reducing atmospheric air pollution in urban agglomerations and include the transition to an ecologically safe logistics network, the introduction of ecological fuels and the increase in the use of ecologically clean types of electric-powered transport. A number of environmental and management measures proposed in the work will contribute to reducing the level of atmospheric air pollution of urban ecosystems and strengthen the actualization of priority air protection measures at the city level of management structures of the administrative body of territorial communities.

Key words: ecology, atmosphere, urban ecosystem, automotive transport, anthropogenic load, pollution, innovation, ecological management.

Вступ

Однією з нагальних екологічних проблем сьогодення є забруднення атмосферного повітря внаслідок антропогенного впливу на довкілля. Екологічний стан атмосферного повітря у великих промислово-міських агломераціях обумовлений рівнем розвитку промислово-виробничого сектора економіки та територіального транспортного навантаження. Головним чинником забруднення атмосферного повітря урбоєкосистем визначають автомобільний транспорт, доля внеску якого сягає близько 60% від загального обсягу забруднюючих речовин, що потрапляють в атмосферне повітря міських екосистем. Стрімке зростання за останні десятиліття автомобільного парку промислово-міських агломерацій сприяє логістичному розвитку економічного сектору країни, але обумовлює збільшення негативного впливу на компоненти навколишнього середовища та здоров'я населення. Функціонування розгалуженої, щільної логістичної системи

України обумовлює ситуацію, коли 80% міського населення країни мешкає в умовах наднормативного шумового та хімічного забруднення внаслідок руху автотранспортних потоків.

Особливо небезпечним є забруднення приземного шару атмосфери вихлопними газами автотранспорту, тому існує нагальна потреба пошуку інноваційних рішень управління логістичною системою країни з метою зниження антропогенного впливу на довкілля. Особливого рівня забруднення зазнають мікрорайони урбанізованих територій у зоні головних автомагістралей загальноміського значення, що має тенденцію до щорічного збільшення. Тому оцінка хімічного забруднення атмосфери та рівня антропогенного навантаження на повітряний басейн великих промислових регіонів є нагальною актуальною задачею, що потребує уваги широкого кола фахівців-екологів.

Аналіз попередніх досліджень (Vnukova et al., 2020; Желновач, 2020; Zhelnovach et al.,

2021) відображає значний інтерес до проблем екології та сталого розвитку в контексті автотранспортних систем. Поширеним серед фахівців є висновок про те, що автотранспорт є одним із головних джерел забруднення атмосфери в урбоекосистемах (Устенко, 2010; Терентьев та ін., 2020), причому викиди вуглеводнів, оксидів азоту, твердих часток та інших шкідливих речовин можуть мати серйозний вплив на якість повітря та здоров'я людей.

Особливістю вирішення екологічних проблем у рамках інноваційного підходу є комплексність (Скорород і Ребрина, 2014), під якою мається на увазі цілеспрямоване якісне відновлення не тільки техніко-технологічної основи виробництва, але і впровадження інноваційних методів та технологій в екологічне управління транспортною системою. Це може включати в себе впровадження електричних транспортних засобів, розвиток інтелектуальних систем управління трафіком, а також застосування зелених технологій у виробництві автомобілів.

Дослідження (Карпіщенко та ін., 2002; Ребрина, 2013; Гетьман, 2014) наголошують на важливості співпраці між урядовими органами, громадськими організаціями, промисловими підприємствами та громадськістю. Спільні зусилля можуть призвести до більш ефективних рішень у сфері екологічного управління та зменшення техногенного навантаження на атмосферу.

Саме вивчення особливостей вищезначених аспектів впровадження інноваційних підходів у екологічному управлінні автотранспортною системою для зменшення техногенного навантаження на атмосферу та забезпечення сталого розвитку урбоекосистем (Федулова, 2014; Михайловська і Татарчук, 2021; Vakharev et al., 2023) є предметом нашого дослідження.

Метою роботи є проведення аналізу інновацій екологічного управління автотранспортною системою урбоекосистем для зниження техногенного навантаження на атмосферу.

Матеріал і методи

У дослідженні використано порівняльний аналіз даних щодо інноваційного екологічного управління автотранспортною системою урбоекосистем, який дозволив вивчити динаміку змін параметрів забруднення атмосфери та визначити заходи екологічного управління щодо впровадження електромобілей, гібридних автомобілів тощо. У роботі використано матеріали Регіональних допо-

відей, Екологічних паспортів та статистичної звітності щодо викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря спостережень за десятирічний період.

Результати і обговорення

Стан повітряного середовища населених міст Полтавської області залишається однією з важливих регіональних природоохоронних проблем. Рівень забруднення атмосферного повітря урбанізованих територій обумовлений обсягами викидів забруднюючих речовин від стаціонарних та пересувних джерел. Стаціонарним джерелам викидів міських агломерацій приділяється особлива увага. Одним із лідерів за стаціонарними джерелами викидів по Полтавській області є місто Кременчук, промислові зони якого представлені потужними підприємствами. Провідними галузями промисловості міста виступають машинобудування, паливна, будівельна, харчова та ін. У таблиці 1 наведено внесок до загального обсягу викидів урбанізованих агломерацій різних районів Полтавської області за 2021 р.

Таблиця 1

Обсяг викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел у Полтавському регіоні, т

Територія	Обсяг викидів, т
Полтавська область, у тому числі, по районах:	52434,458
Кременчуцький	28511,633
Лубенський	7539,687
Миргородський	9426,798
Полтавський	6956,340

За даними таблиці 1 найбільший антропогенний вплив на екологічний стан атмосферного повітря Полтавської області чинить промисловий центр регіону – урбанізована агломерація м. Кременчука. В цілому, за річними показниками на м. Кременчук припадає близько 27,4% усіх викидів забруднюючих речовин в атмосферу стаціонарними джерелами по області. Обсяги викидів шкідливих речовин у розрахунку на одну особу у Полтавській області становлять біля 19,8 кг, при цьому найвищі показники – у Кременчуцькому районі, а саме: 74 кг на кожного мешканця. Для достовірного виконання оцінки рівня забруднення атмосферного повітря промислово-міської агломерації Кременчука важливим кроком є проведення порівняльного аналізу техногенного навантаження на повітряний басейн за обсягами

викидів від стаціонарних і пересувних джерел на території міста. На рис. 1 наведено динаміку по роках викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними та пересувними джерелами на території Полтавської області.

Розрахунок обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від пересувних джерел (в тому числі від автотранспорту) Головним управлінням статистики

в Полтавській області за 2016–2022 роки не здійснювався. Але за даними рис. 1 переважаючими джерелами забруднення атмосфери на території Полтавської області є викиди саме від пересувних джерел, що становлять 62,7% від загальнорічних обсягів. Серед парку пересувних транспортних засобів вагома роль у забрудненні атмосферного повітря викидами належить автотранспортній логістичній системі міст (рис. 2).

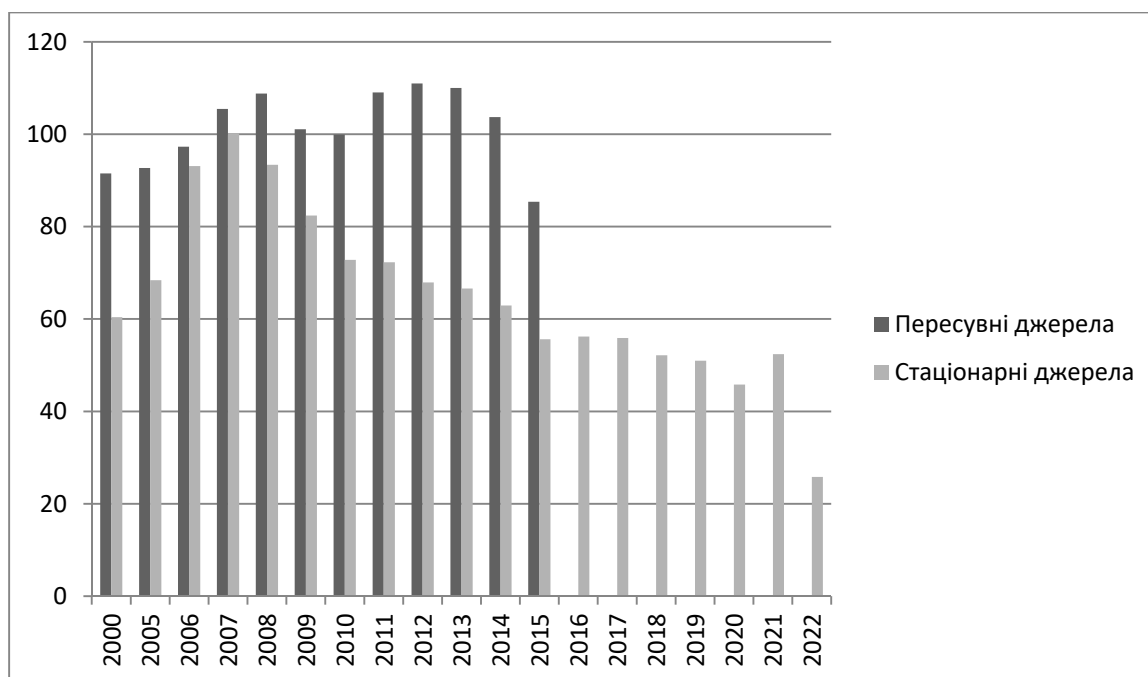


Рис. 1. Річна динаміка викидів забруднюючих речовин в атмосферу Полтавської області стаціонарними та пересувними джерелами, тис. т

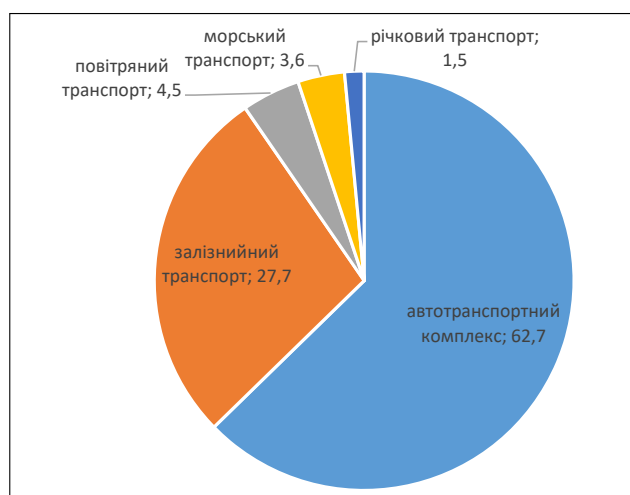


Рис. 2. Забруднення середовищ довкілля засобами транспортної системи, %

При цьому у складі викидів забруднюючих речовин переважають сполуки SO_2 , CO , CO_2 , NO_2 , неметанові леткі органічні сполуки.

У таблиці 2 наведено обсяги викидів означених забруднюючих речовин у м. Кременчуці та в цілому по Полтавській області.

За даними спостережень Полтавської гідрометлабораторії щодо динаміки середньомісячних концентрацій забруднюючих речовин за останні 5 років (2018–2022 рр.) відмічається зростання забруднення CO та SO_2 . Спостерігається підвищення середньорічного вмісту формальдегіду. Результати спостережень свідчать, що загальний рівень забруднення промислової столиці Полтавщини – міста Кременчук у 2022 році

Таблиця 2

Обсяги викидів забруднюючих речовин, т

Територія	SO ₂	NO ₂	NO	CO ₂	CO	CH ₄	Сажа	Неметанові леткі органічні сполуки
Полтавська обл.	3654,7	9799,4	67,5	1970,5 x10 ³	11584,3	6113,2	166,6	11023,1
Кременчук	1461,0	1145,5	2,3	288,8	1729,5	257,7	24,5	8635,4
%	39,98	11,69	3,41	14,66	15,02	4,21	14,71	78,34

Примітка. Інформація Головного управління статистики в Полтавській області (Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Полтавській області у 2021 році)

(як і у попередніх) характеризується як високий.

Занепокоєння екологів викликає значна частка парникових газів у викидах різних джерел Полтавського області. М. Кременчук посідає одне з перших місць за обсягами цих газів. Значна частина забруднюючих речовин, що потрапляють в атмосферне повітря, припадає на автомобільний транспорт (30–40%). Зростання його кількості в м. Кременчук, у тому числі, за рахунок автомобілів, які вже певний час були в експлуатації і технічний стан яких не відповідає сучасним європейським екологічним стандартам, призводить до збільшення викидів в атмосферне повітря пересувними джерелами (рис. 3).

За обсягами викидів від автотранспорту м. Кременчук посідає друге місце по Полтавській області після м. Полтава. До складу викидів автотранспорту входять такі шкідливі речовини, як CO, CH₄, N₂O, тверді частинки та леткі органічні сполуки.

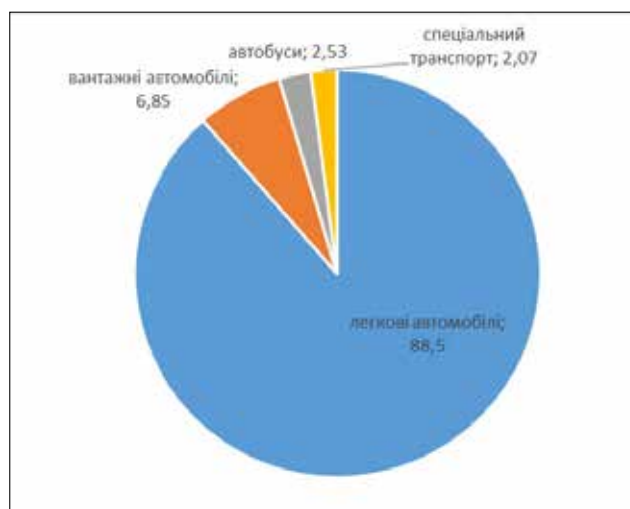


Рис. 3. Структура автотранспортного парку м. Кременчук

Відомо, що 90% викидів CO, які потрапляють в атмосферу, спричинені автомобільним транспортом. Викиди, що утворюються при експлуатації автотранспортних засобів є вагомим фактором глобальних кліматичних змін. У викидах парникових газів частка автомобільного транспорту останніми роками досягла до 84,5%.

Важливими екологічними аспектами логістичних структур щодо обсягів утворених викидів, які рекомендовано приймати до уваги під час розробки заходів зі зниження забруднення навколишнього середовища, є:

- інтенсивність транспортних потоків;
- співвідношення приватного та громадського транспорту;
- види палива, електроживлення;
- потужність двигуна (Подрігало та ін., 2022);
- відходи експлуатації.

Але під час розробки управлінських рішень щодо зниження техногенного впливу на довкілля засобів транспортної системи міських агломерацій необхідно враховувати і важливу соціально-економічну роль автотранспортної логістики для життєзабезпечення урбанізованого середовища. Регіональна автотранспортна система формує логістичну структуру, що включає автотранспортні засоби, автотранспортну інфраструктуру, автотранспортні підприємства (рис. 4), які необхідно приймати до уваги для комплексного підходу щодо розробки ефективних екологічно спрямованих проектних управлінських рішень.

Загалом, автотранспорт чинить значне екологічне навантаження на атмосферне повітря, земельні та водні ресурси, впливає на біорізноманіття і загалом на здоров'я населення (Никифоров та ін., 2019). Особливо міське середовище і населення крупних урбанізованих агломерацій відчу-

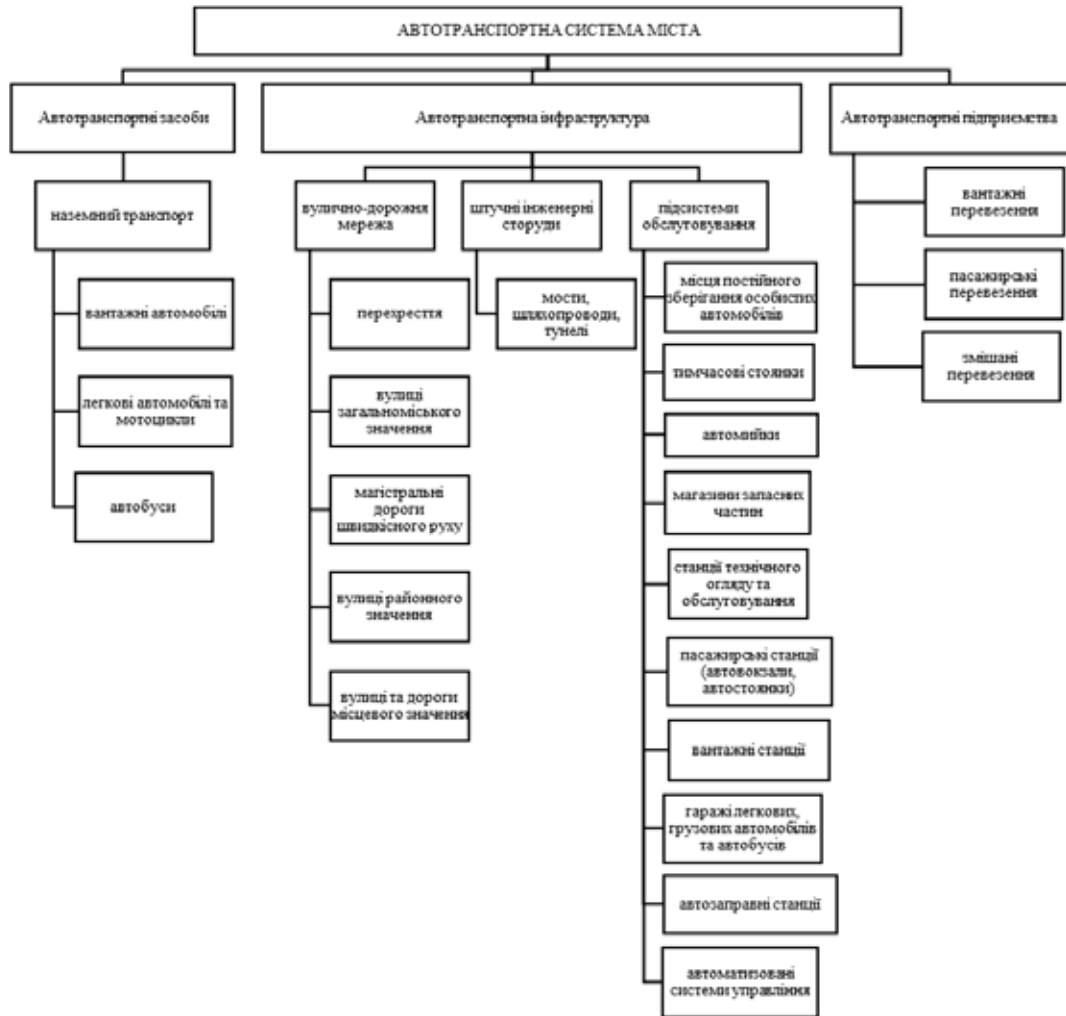


Рис. 4. Структура автотранспортної системи міста (за даними Регіонального сервісного центру у Полтавській області)

ває суматійний ефект негативного впливу забруднюючих речовин викидів транспортних засобів логістичної мережі промислових і селітебних зон міста (рис. 5).

Для розробки управлінських рішень щодо екологічного врегулювання процесу експлуатації логістичної системи міської агломерації з метою зменшення негативного техногенного впливу на складові урбоєкосистеми у роботі запропонований комплексний підхід з розробки екологічних заходів із залученням етапів емпіричного та теоретичного обґрунтування складових екологічного управління на міському рівні.

Для дослідження впливу забруднюючих факторів на довкілля від рухового автомобільного парку у межах проїжджій частині та житлової забудови міста планування й розробка екологічно спрямованих заходів передбачає на першому етапі проведення натурних обстежень міської території

з метою отримання інформації щодо характеристик існуючої екологічної ситуації. Для обліку дій усіх екологічних чинників у роботі запропоновано застосування комплексного підходу щодо оцінки рівня екологічної безпеки в умовах впливу автотранспорту. Етап експериментальних досліджень передбачає визначення екологічного стану складових навколишнього середовища від впливу автотранспорту за існуючими методиками. По-перше, мета цих досліджень полягає у виявленні особливостей і закономірностей розподілу та впливу забруднюючих факторів на навколишнє середовище і людину. Рівень екологічної безпеки залежить від впливу забруднюючих чинників автотранспорту і являє собою явище, що підпорядковується законам теорії ймовірності й математичної статистики, тому результати досліджень підлягають обробці за відповідними методиками математичного



Рис. 5. Вплив автотранспорту на міське середовище та населення

апарату. З урахуванням вказаних теоретично-прикладних передумов у роботі розроблена система планування експериментальних досліджень щодо екологічного впливу процесу експлуатації автотранспортної системи міста. На підставі отриманих результатів натурних спостережень за рівнем прояву кожного досліджуваного чинника забруднення довкілля від автотранспорту (викиди, шум, вібрація) і обґрунтування їх сумарного впливу на навколишнє середовище та людину у роботі розроблений алгоритм розрахунку комплексної оцінки екологічної небезпеки у середовищі під дією негативного впливу автомобільного транспорту (рис. 6).

Для полегшення обрахунку рівня забруднення навколишнього середовища автотранспортом запропоновано у розробленому алгоритмі проводити розрахунок рівня екологічної безпеки під дією впливу чинників забруднення довкілля (викиди, шум, вібрація) за допомогою програмного продукту «ЕкоАвто». За результатами порівняльного аналізу визначається рівень екологічної небезпеки у певних точках дослідження міської системи.

Після визначення за вказаним алгоритмом рівня екологічної небезпеки певної урбоєкосистеми (на прикладі обстеження ділянок вулично-дорожньої мережі у м. Кременчук виявлений «критичний» рівень екологічної небезпеки) у роботі

запропонований етап розробки проектного переліку екологічних заходів управлінського спрямування щодо зниження впливу факторів забруднення довкілля автотранспортом на території міської агломерації.

Для зменшення забруднення атмосферного повітря пересувними джерелами необхідний комплексний підхід щодо управлінських рішень, які забезпечуватимуть реалізацію економічних важелів переходу на екологічно безпечну логістичну міську мережу. Перспективним є запровадження заходів щодо переходу на екологічні види палива, запровадження «зелених хвиль» на автошляхах, організація транспортних потоків центру міської системи з організацією одностороннього руху автотранспорту, розвиток транспортної інфраструктури, що мінімізуватиме необхідність використання великої кількості автотранспорту. Збільшення частки використання більш екологічних видів транспорту на електроживленні призведе до значного зменшення навантаження на складові довкілля, на кліматичні показники, матиме ряд соціальних та економічних переваг. Позитивний ефект екологічно спрямованих заходів у автотранспортному парку міста посилить робота зі створення додаткових зон зелених насаджень вздовж вулиць, автомагістралей для захисту селітебних територій від забруднюючих речовин викидів та шумового забруд-



Рис. 6. Алгоритм оцінки рівня екологічної небезпеки від впливу чинників забруднення довкілля автотранспортом

нення. Важливою управлінською складовою є перегляд проектів санітарно-захисних зон виробничих об'єктів з метою зниження негативного впливу викидів стаціонарних джерел забруднення на компоненти довкілля. Екологічне управління за розробленим алгоритмом оцінки рівня екологічної небезпеки міських територій повинно включати питання щодо здійснення моніторингу наявності у суб'єктів господарювання дозволів на викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами, створення публічної відкритої інформаційно-аналітичної системи моніторингу якості атмосферного повітря в межах міської агломерації.

Висновки

У статті проведено аналіз динаміки викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними та пересув-

ними джерелами на території Полтавської області та визначено структуру автотранспортного парку міста Кременчука. Під час розробки управлінських рішень для зниження техногенного впливу на атмосферне повітря автотранспорту урбоєкосистеми запропоновано комплексний підхід, який включає перехід до екологічно безпечної логістичної мережі, впровадження екологічних видів палива та збільшення використання екологічно чистих видів транспорту на електроживленні. Запропонована у роботі низка екологічно-управлінських заходів сприятиме зниженню рівню забруднення атмосферного повітря урбоєкосистем та посилюватиме актуалізацію пріоритетних заходів з охорони повітря на міському рівні управлінських структур адміністративного корпусу територіальних громад.

Список використаної літератури

Гетьман А.П. Організаційно-правовий механізм охорони навколишнього природного середовища. *Проблеми законності*. 2014. Вип. 125. С. 119–128.

Желновач Г.М. Ієрархічно керована динамічна система забезпечення екологічної безпеки дорожньої галузі України. *Вісник ХНАДУ*. 2020. Вип. 90. С. 95–102.

Карпіщенко Т.О., Карпіщенко О.І., Ілляшенко К.В. Науково-методичні основи удосконалення економічного механізму розвитку еколого-інноваційної діяльності. *Механізм регулювання економіки, економіка природокористування та організація виробництва*. 2002. № 1–2. С. 46–54.

Михайловська О.В., Татарчук М.С. Екологічна складова розвитку територіальних громад. *Дніпровський науковий часопис публічного управління, психології, права*. 2021. № 2. С. 11–15.

Никифоров В.В., Сақун О.А., Пасенко А.В., Новохатько О.В., Мазницька О.В. Структуризація біологічних макросистем. *Біологія і екологія*. 2019. Том 5. № 1. С. 83–88.

Подригало М., Тарасов Ю., Холодов М., Шеїн В., Ткаченко О., Касьяненко О. Оцінка підвищення енергоефективності автомобілів при раціональному зниженні потужності двигунів. *Автомобільний транспорт*. 2022. № 51. С. 26–34.

Ребрина Н. Екологічні інновації як інструмент досягнення екологічної безпеки транскордонного регіону. *Науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки*. 2013. № 9. С. 26–29.

Скороход І.С., Ребрина Н.Г. Дослідження факторів впливу на еко-інноваційну діяльність підприємств в умовах транскордонного співробітництва. *Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України*. 2014. Вип. 2 (106). С. 264–273.

Терентьев О.М., Сергієнко М.І., Смоляр В.Г. Вплив промислового автомобільного транспорту на навколишнє середовище. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2020. № 3 (61). С. 85–91.

Устенко М.О. Основні проблеми транспортної логістики. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2010. № 29. С. 236–238.

Федулова А.І. Формування регіональних інноваційних систем у контексті принципів європейської інноваційної політики. *Академічний огляд*. 2014. № 1 (40). С. 144–155.

Bakharev V., Chugai A., Soloshych I., Kortsova O. Development and practical testing of the zonal-indicative methodology for assessing the impact of industrial enterprises on the state of atmospheric air pollution. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2023. Vol. 24. iss. 2. P. 11–18. <https://doi.org/10.12912/27197050/156963>.

Vnukova N., Zhelnovach G., Kozlovskiy O. “Green” principles of sustainable development of road and transport infrastructure of the cities of Ukraine. *IOP Conference Series: materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 907. P. 1–9.

Zhelnovach G., Belokon K., Manidina Ye., Tkalic I. Researching the degradation of roadside plant communities. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2021. Vol. 8 (2). P. 345–352.

References (translated & transliterated)

Hetman, A.P. (2014). Orhanizatsiino-pravovyi mekhanizm okhorony navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha [Organizational and legal mechanism of environmental protection]. *Problemy zakonnosti [Problems of legality]*, 125, 119–128 [in Ukrainian].

Zhelnovach, H.M. (2020). Iierarkhichno kerovana dynamichna systema zabezpechennia ekolohichnoi bezpeky dorozhnoi haluzi Ukrainy [Hierarchically managed dynamic system of ensuring environmental safety of the road industry of Ukraine]. *Visnyk KhNADU [Herald of the KhNADU]*, 90, 95–102. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2020.90.0.95> [in Ukrainian].

Karpishchenko, T.O., Karpishchenko, O.I., & Illiashenko, K.V. (2002). Naukovo-metodychni osnovy udoskonalennia ekonomichnoho mekhanizmu rozvytku ekoloho-innovatsiinoi diialnosti [Scientific and methodological foundations of improving the economic mechanism of the development of ecological and innovative activities]. *Mekhanizm rehuliuвання ekonomiky, ekonomika pryrodokorystuvannia ta orhanizatsiia vyrobnytstva [Mechanism of regulation of the economy, economy of nature use and organization of production]*, 1–2, 46–54 [in Ukrainian].

Mykhailovska, O.V., & Tatarchuk, M.S. (2021). Ekolohichna skladova rozvytku terytorialnykh hromad [Ecological component of development of territorial communities]. *Dniprovskiyi naukovyi*

chasopys publichnoho upravlinnia, psykholohii, prava [Dnipro scientific journal of public administration, psychology, law], 2, 11–15. <https://doi.org/10.51547/ppp.dp.ua/2021.2.2> [in Ukrainian].

Nykyforov, V.V, Sakun, O.A., Novokhatko, O.V., Maznytska, O.V., & Pasenko, A.V. (2019). Strukturyzatsiia biolohichnykh makrosystem [Structuring of biological macrosystems]. *Biolohiia i ekolohiia [Biology and ecology]*, 5 (1), 83–88. <https://doi.org/10.33989/2414-9810.2019.5.1.195121> [in Ukrainian].

Podryhalo, M., Tarasov, Yu., Kholodov, M., Shein, V., Tkachenko, O., & Kasianenko, O. (2022). Otsinka pidvyshchennia enerhoefektyvnosti avtomobiliv pry ratsionalnomu znyzhenni potuzhnosti dvyhuniv [Assessment of the increase in energy efficiency of cars with a rational reduction in engine power]. *Avtomobilnyi transport [Automobile transport]*, 51, 26–34. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2022.51.0.03> [in Ukrainian].

Rebryna, N. (2013). Ekolohichni innovatsii yak instrument dosiahnennia ekolohichnoi bezpeky transkordonnoho rehionu [Ecological innovations as a tool for achieving ecological security of the cross-border region]. *Scientific Bulletin of Lesya Ukrainka East European National University [Scientific Bulletin of Lesya Ukrainka East European National University]*, 9, 26–29 [in Ukrainian].

Skorokhod, I.S., & Rebryna, N.H. (2014). Doslidzhennia faktoriv vplyvu na ekoinnovatsiinu diialnist pidpriemstv v umovakh transkordonnoho spivrobitnytstva [Study of influencing factors on the eco-innovative activity of enterprises in the conditions of cross-border cooperation]. *Sotsialno-ekonomichni problemy suchasnoho periodu Ukrainy [Socio-economic problems of the modern period of Ukraine]*, 2 (106), 264–273 [in Ukrainian].

Terentiev, O.M., Serhienko, M.I., & Smoliar, V.H. (2020). Vplyv promyslovoho avtomobilnoho transportu na navkolyshnie seredovyshe [The impact of industrial road transport on the environment]. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia [Energy: economy, technologies, ecology]*, 3 (61), 85–91. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2020.228634> [in Ukrainian].

Ustenko, M.O. (2010). Osnovni problemy transportnoi lohistyky [The main problems of transport logistics]. *Visnyk ekonomiky transportu i promyslovosti [Herald of the economy of transport and industry]*, 29, 236–238 [in Ukrainian].

Fedulova, L.I. (2014). Formuvannia rehionalnykh innovatsiinykh system u konteksti pryntsyviv yevropeiskoi innovatsiinoi polityky [Formation of regional innovation systems in the context of the principles of European innovation policy]. *Akademichnyi ohliad [Academic review]*, 1 (40), 144–155 [in Ukrainian].

Bakharev, V., Chugai, A., Soloshych, I., & Kortsova, O. (2023). Development and practical testing of the zonal-indicative methodology for assessing the impact of industrial enterprises on the state of atmospheric air pollution. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 24 (2), 11–18. <https://doi.org/10.12912/27197050/156963> [in English].

Vnukova, N., Zhelnovach, G., & Kozlovskiy, O. (2020). “Green” principles of sustainable development of road and transport infrastructure of the cities of Ukraine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 907, 1–9. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/907/1/012068> [in English].

Zhelnovach, G., Belokon, K., Manidina, Ye., & Tkalich, I. (2021). Researching the degradation of roadside plant communities. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 8 (2), 345–352 [in English].

Отримано: 29.04.2024

Прийнято: 13.05.2024



УДК 556.55(477.82)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.29>

ОСОБЛИВОСТІ СУЧАСНОГО СТАНУ ЕВТРОФІКАЦІЇ ШАЦЬКИХ ОЗЕР

В. О. Фесюк¹, І. М. Нетробчук², С. В. Полянський³, Д. Я. Довган⁴

Шацькі озера – це група з понад 30 мальовничих озер на північному заході України, в межах Шацького національного природного парку. Ці озера мають важливе значення як оселище для численних рідкісних та зникаючих видів рослин і тварин, занесених до Червоної книги України та міжнародних природоохоронних реєстрів. Як і інші озера в наш час вони зазнають евтрофікації. Це спричинює зниження якості води, вмісту кисню, «цвітіння» води, погіршення умов існування гідробіонтів. В той же ж час Шацькі озера є одним із найвідоміших рекреаційних регіонів України.

Актуальність роботи полягає у необхідності оцінки евтрофікованості озер та її впливу на їх раціональне використання та охорону.

Метою статті є оцінка евтрофікованості Шацьких озер, визначення чинників, що впливають на ступінь евтрофікації, розробка заходів зниження евтрофікованості озер та поліпшення їх гідрологічного стану.

Використано методи збору матеріалів, їх статистичної обробки, дистанційного зондування Землі, картографічний, експертних оцінок.

Встановлено, що рівень евтрофікованості досліджуваних озер не високий. Навіть в літній період для більшості озер NDVI не перевищує 0,2. Для окремих (Світязь, Луки, Перемут, Пулемецьке) цей показник ще нижчий. Це зумовлено особливостями озер: карстовим походженням, значними глибинами та площами водного дзеркала, високою стійкістю їх екосистем, порівняно невисоким

¹ доктор географічних наук, професор,
завідувач кафедри фізичної географії
(Волинський національний університет імені Лесі Українки, м. Луцьк)
e-mail: fesyuk@ukr.net
ORCID: 0000-0003-3954-9917

² кандидат географічних наук, доцент,
доцент кафедри фізичної географії
(Волинський національний університет імені Лесі Українки, м. Луцьк)
e-mail: netrobchuk.iryua@vnu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-8633-7426

³ кандидат географічних наук, доцент,
доцент кафедри фізичної географії
(Волинський національний університет імені Лесі Українки, м. Луцьк)
e-mail: polianskyi.serhiy@vnu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-8666-7695

⁴ магістрант кафедри фізичної географії
(Волинський національний університет імені Лесі Українки, м. Луцьк)
e-mail: den16dov@gmail.com
ORCID: 0009-0005-6255-2032

рівнем господарського освоєння. Хоча евтрофікація і незначна, але відчувається вплив глобальної зміни клімату на стан озерних екосистем. Цей вплив буде зростати в майбутньому. Тому дуже важливою є розробка заходів зменшення евтрофікованості та поліпшення фії гідроекологічного стану Шацьких озер.

Ключові слова: озеро, лімносистема, гідроекологічний стан озера, евтрофікація, чиники евтрофікації, заходи зменшення евтрофікації.

FEATURES OF THE CURRENT STATE OF EUTROPHICATION OF SHATSK LAKES

V. O. Fesyuk, I. M. Netrobchuk, S. V. Polyansky, D. Y. Dovgan

The Shatsk Lakes are a group of more than 30 picturesque lakes in northwestern Ukraine, within the Shatsk National Nature Park. These lakes are important as a habitat for numerous rare and endangered species of plants and animals listed in the Red Data Book of Ukraine and international conservation registers. Like other lakes, they are currently experiencing eutrophication. This leads to a decrease in water quality, oxygen content, water blooms, and deterioration of the living conditions for aquatic life. At the same time, the Shatsk Lakes are one of the most famous recreational regions of Ukraine. The relevance of the work lies in the need to assess the eutrophication of lakes and its impact on their rational use and protection.

The purpose of the article is to assess the eutrophication of the Shatsk Lakes, to determine the factors that determine the degree of eutrophication, to develop measures to reduce the eutrophication of the lakes and improve their hydroecological condition.

The methods used were data collection, statistical processing, remote sensing, cartographic, and expert assessment.

It was found that the level of eutrophication of the studied lakes is not high. Even in summer, for most lakes, the NDVI does not exceed 0.2. For some (Svityaz, Luky, Peremut, Pulemetske), this index is even lower. This is due to the peculiarities of the lakes: karst origin, significant depths and areas of the water mirror, high stability of their ecosystems, and a relatively low level of economic development. Although eutrophication is insignificant, the impact of global climate change on the state of lake ecosystems is felt. This impact will increase in the future. Therefore, it is very important to develop measures to reduce eutrophication and improve the hydroecological status of the Shatsk Lakes.

Key words: lake, limnosystem, hydroecological state of the lake, eutrophication, eutrophication factors, measures to reduce eutrophication.

Вступ

Багато озер зазнають інтенсивної евтрофікації через надлишкове надходження поживних речовин, переважно азоту та фосфору, до водойм. Це призводить до «цвітіння» води, зниження кисневого режиму та загибелі гідробіонтів. Основними причинами такого явища є надмірне застосування добрив у сільському господарстві, а також скид неочищених стічних вод із території населених пунктів, сільськогосподарських угідь та тваринницьких ферм, а також стоки з стихійних сміттевалищ. Евтрофікація спричиняє деградацію унікальних озерних екосистем та загрожує існуванню рідкісних видів. Погіршення якості води негативно впливає на рекреаційне використання озер та знижує їх рибопродуктивність, завдає економічних збитків.

Дослідження евтрофікації озер широко висвітлені в науковій літературі. Так, зокрема, це питання детально розгляда-

ється в монографії (Wetzel, 2001). У роботі (Smith et al., 2006) досліджено особливості евтрофікації прісноводних і морських екосистем, у статті (Schindler, 2012) розглядається парадокс продуктивності озер, у (Elser et al., 2007) проведено глобальний аналіз обмеження азоту та фосфору первинних продуцентів у прісноводних, морських та наземних екосистемах, у (Gulati & van Donk, 2002) проаналізовано основні аспекти відновлення озер у Нідерландах.

Значна увага в науковій літературі приділяється і дослідженню евтрофікації Шацьких озер. У роботі (Конішук & Христецька, 2023) проведена екологічна оцінка евтрофікації озер біосферного резервату «Шацький», у роботі (Арсан та ін., 2012) висвітлено результати еколого-токсикологічних досліджень озерних екосистем Шацького НПП, у статті (Зуб, 2012) проведено оцінку екологічного стану оз. Світязь за багаторічною динамікою рослинних комплексів акваль-

них біотопів, у (Ковальчук, 2022) досліджено трансформацію водних об'єктів Шацького поозер'я за результатами оцінки антропогенного навантаження на поверхневій воді, а у роботі (Ковальчук, 2008) проаналізовано рівень антропогенного навантаження на природні комплекси стаціонарними джерелами забруднення Шацького НПП, у (Назарук, 2011) вивчено структуру угруповань зоопланктону озера Пісочне як показник його евтрофікації.

Аналіз наявних наукових праць показує, що, незважаючи на значну кількість досліджень, вивчення проблеми евтрофікації Шацьких озер має фрагментарний характер. Залишається низка питань, які потребують подальшого вивчення, зокрема, щодо впливу евтрофікації на рекреаційне використання озер та прогнозування наслідків глобальних кліматичних змін на рівень евтрофікації цих водойм. Таким чином, подальші комплексні наукові дослідження в цьому напрямку є важливими та актуальними.

Мета статті: оцінка евтрофікованості Шацьких озер, визначення чинників, що визначають ступінь евтрофікації, розробка заходів зниження евтрофікованості озер та поліпшення їх гідроекологічного стану. Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити особливості природних умов Шацького поозер'я;
- проаналізувати чинники, що впливають на евтрофікацію озер;
- оцінити сучасний стан евтрофікованості озер;
- обґрунтувати шляхи зменшення евтрофікації озер та поліпшення їх гідроекологічного стану.

Матеріал і методи

Інформаційною базою роботи були матеріали Департаменту екології та природних ресурсів Волинської облдержадміністрації (Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища у Волинській області за 2022 р.), Шацької селищної громади (Програма охорони навколишнього природного середовища на 2023–25 рр.), матеріали електронних картографічних сервісів та онлайн-сервісів для обробки супутникових знімків, літературні джерела.

Гідроекологічна оцінка проведена згідно з Методикою екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями (Романенко та ін., 1998). Для оцінки ступеня евтрофікованості використано методи дистанційного зондування Землі. Статистична обробка даних гідроеколо-

гічного моніторингу проведена методами: дескриптивної статистики, кореляційного аналізу, оцінки варіації.

Результати та обговорення

Шацьке поозер'я – унікальний природний комплекс на північному заході України у Волинській області. Цей регіон характеризується високою концентрацією озер карстового та льодовикового походження, мальовничими ландшафтами та значним біологічним різноманіттям. Територія сформувалася під впливом четвертинного зледеніння, для неї типовим є горбистий, місцями горбисто-западинний рельєф з переважанням кінцево-моренних гряд, озових пасом, западин та котловин озер. Гідрогеологічні умови регіону визначаються його розташуванням у північно-західній частині Волино-Подільського артезіанського басейну, в зоні інтенсивного розвантаження підземних вод, що зумовлює підвищений поверхневий і підземний стік. Формування поверхневих і підземних вод Шацького поозер'я є результатом взаємодії різноманітних абіотичних та біогенних чинників (Зузук, 2014).

Клімат Шацького поозер'я сприятливий для розвитку рекреації, характеризується м'якою зимою, теплим літом та більш-менш рівномірним розподілом опадів протягом року.

Окрім важливого значення як частина трилатерального біосферного резервату, Шацьке поозер'я також виконує ключову роль як ядро міжнародної екологічної мережі та як водно-болотне угіддя міжнародного значення. Тут представлено 57 видів рослин і тварин та 27 видів оселищ, занесених до Бернської конвенції. Район Шацьких озер є також важливою територією для збереження птахів (Карпюк і Фесюк, 2021).

На відносно невеликій території сформувалось унікальне поєднання великої кількості озер, які надзвичайно різноманітні за походженням, розмірами та глибиною. Тут налічується понад 30 озер загальною площею близько 6,5 тис. га, серед яких найбільшими є Світязь, Пулемецьке, Луки, Пісочне, Кримне.

Живлення озер змішане, вони отримують води з атмосферних, ґрунтових та поверхневих джерел. Вода в них прозора та чиста. За походженням озера поділяються на карстово-тектонічні, суфозійно-карстові та заплавні. Залежно від режиму рівня води, вони поділяються на дві групи: з стабільним положенням рівня та з вираженими сезонними й внутрішньосезонними коли-

ваннями. Більшість озер є малими за розмірами, мають помірний водообмін, що вказує на їх автохтонність.

Донні відклади озер представлені, переважно, змішаними типами сапропелів органо-вапнякового, вапнякового та органо-залізного складу, а також значними запасами кластогенних відкладів органо-піщаного та органо-глинистого типів.

Морфометричні особливості озерних улоговин впливають на гідрологічні та гідрохімічні характеристики водойм. Більшість озер мають округлу або овальну форму з рівною береговою лінією, для окремих (Світязь, Пулемецьке) характерна складна улоговина з декількома карстовими лійками, асиметричною формою та виходами крейди на берегах (Ільїн, 2008).

Карстові озера, здебільшого, займають безстічні улоговини з незначним поверхневим водозбором, їх береги піщані, часто з торфовими утвореннями, а дно на мілинах – піщане та тверде, у межах карстових лійок – мулисте. Окремі озера перебувають на стадії замулення та заростання.

За джерелами живлення озера Шацького поозер'я поділяються на три групи: атмосферно-напірного живлення (Чорне Велике, Світязь, Люцимер), атмосферно-грунтового живлення (Пулемецьке, Острів'янське, Луки) та атмосферно-притокового живлення (Кримне) (Зузук, 2014).

За водним балансом озера регіону поділяються на стічні та безстічні. Стічні озера, крім випаровування, мають втрати на поверхневий і підземний стік. Безстічні озера не мають втрат за рахунок підземного та поверхневого витоку.

Розрахунки водного балансу озер Шацького поозер'я, проведені І.Ю. Наседкіним та Г.П. Рябцевою, показують, що час повного заміщення води в озерах коливається від 1,1 року (Кримне) до 7–8 років (Світязь). Ці дані свідчать про різний режим водообміну в озерах регіону (Зузук, 2014).

Господарське освоєння досліджуваної території невисоке. Більша частина Шацького поозер'я знаходиться в межах Шацької територіальної громади. В межах громади відсутні великі підприємства та значні забруднювачі довкілля. Практично основними забруднювачами є сільське господарство та комунальна сфера. Понад 80% ТГ знаходиться в межах Шацького національного природного парку, який і створений для охорони Шацької групи озер. На теренах громади наразі пов-

ністю чи частково знаходяться озера: Світязь, Люцимер, Чорне, Кругле, Довге, Карасинець, Соминець, Пісочне, Кримне, Перемут, Плотиччя, Озерце, а також кілька менших озер. В структурі використання земель ТГ на лісовкриті землі припадає 53,1%, сільськогосподарські землі – 39,4%, луки і пасовища – 1,8%, інші землі (в т.ч. селитебні) – 5,7%.

Лише 6% мешканців селища Шацьк забезпечено каналізацією та водопостачанням. Але зараз реалізується міжнародний проект по каналізуванню населених територій поблизу озер, а тому з часом більшість мешканців будуть забезпечені цими послугами. На території громади організовано збір та вивезення твердих побутових відходів з приватних домогосподарств на полігон захоронення селища Шацьк.

Меліоративні системи на теренах громади морально застарілі, фізично зношені, потребують реконструкції чи ренатуралізації.

Екологічну оцінку якості води можна провести лише для тих озер, де проводився гідроекологічний моніторинг. Екологічна оцінка якості води виконана згідно Методики екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями (Романенко та ін., 1998) в роботі (Ковальчук, 2022).

За її результатами по блоку показників соляового складу I категорією якості оцінюється вода оз. Люцимер, IV – оз. Пісочне, Перемут, Линовець; VI і VII категорією – оз. Світязь, Пулемецьке, Луки, Чорне Велике. За трофо-сапробіологічними показниками вода оз. Пулемець і Перемут оцінена II класом і II категорією, оз. Світязь, Люцимер, Луки, Чорне Велике – III класом і IV категорією; оз. Пісочне – III класом і V категорією. За вмістом специфічних речовин води озер оцінено: оз. Перемут – II класу III категорії, оз. Світязь, Люцимер, Пулемецьке, Лука і Чорне Велике – III класу IV категорії, оз. Пісочне – III класу V категорії, оз. Линовець – III класу VI категорії.

За сумарним екологічним індексом (I_e) в роботі (Ковальчук, 2022) озера класифіковано на групи:

1. Оз. Перемут ($I_e = 3,03$), – II клас, II–III категорія, за природним станом води «добрі», за ступенем чистоти – «чисті», «досить чисті».

2. Оз. Люцимер ($I_e = 3,64$) – III клас, III–IV категорія, за природним станом води «добрі», «задовільні», за ступенем чистоти – «чисті», «слабозабруднені».

3. Оз. Світязь ($I_e = 4,07$), Пулемецьке ($I_e = 4,1$) – III клас, IV-V категорія, за природним станом – «задовільні», «посередні», за ступенем чистоти – «забруднені», «помірно забруднені».

4. Оз. Луки ($I_e = 4,38$), Пісочне ($I_e = 4,43$), Линовець ($I_e = 4,67$), Чорне Велике ($I_e = 4,08$) – III клас, V категорія, за природним станом – «задовільні», «посередні», за ступенем чистоти – «забруднені», «помірно забруднені».

Оцінка евтрофікованості Шацьких озер та її динаміки проведена методами дистанційного зондування Землі. Зокрема, проведено дослідження евтрофікації озер з використанням індексу NDVI (рис. 1), NDCI (рис. 2), внутрішньорічної динаміки індексу NDVI протягом 2023 р. (рис. 3).

Використання індексу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) для оцінки евтрофікації озер найбільш поширене. Він дозволяє ефективно оцінювати рівень евтрофікації озер, розраховується як різниця між відбиттям у червоному та інфрачервоному діапазонах, нормалізована на їх суму і відображає кількість зеленої рослинності на поверхні води, що напряду пов'язано з рівнем евтрофікації (NDVI).

Основні етапи застосування індексу NDVI для моніторингу евтрофікації озер:

1. Отримання супутникових знімків дослідженої території з необхідними характеристиками (просторове, спектральне та часове розрізнення).

2. Розрахунок значень NDVI для кожного пікселя зображення.

3. Аналіз просторового розподілу NDVI з метою виявлення ділянок з високими значеннями, які відповідають інтенсивному «цвітінню» води.

4. Кореляція отриманих карт NDVI з даними наземних вимірювань вмісту біогенних речовин, хлорофілу, прозорості води для калібрування моделі.

Такий підхід дозволяє ефективно виявляти і картографувати зони евтрофікації в межах озерних акваторій, що складніше здійснити лише наземними методами.

Також для моніторингу стану водойм використовується індекс NDCI (Normalized Difference Chlorophyll Index). Цей індекс також тісно корелює з процесами евтрофікації (див. рис. 2). Якщо NDVI відображає загальну кількість зеленої рослинності, то NDCI конкретніше оцінює концентрацію хлорофілу у воді. Високі значення NDCI вказують на підвищену концентрацію хлорофілу, а отже активний розвиток фітопланктону у водоймі, що є ознакою евтрофікації. Основні етапи застосування NDCI для

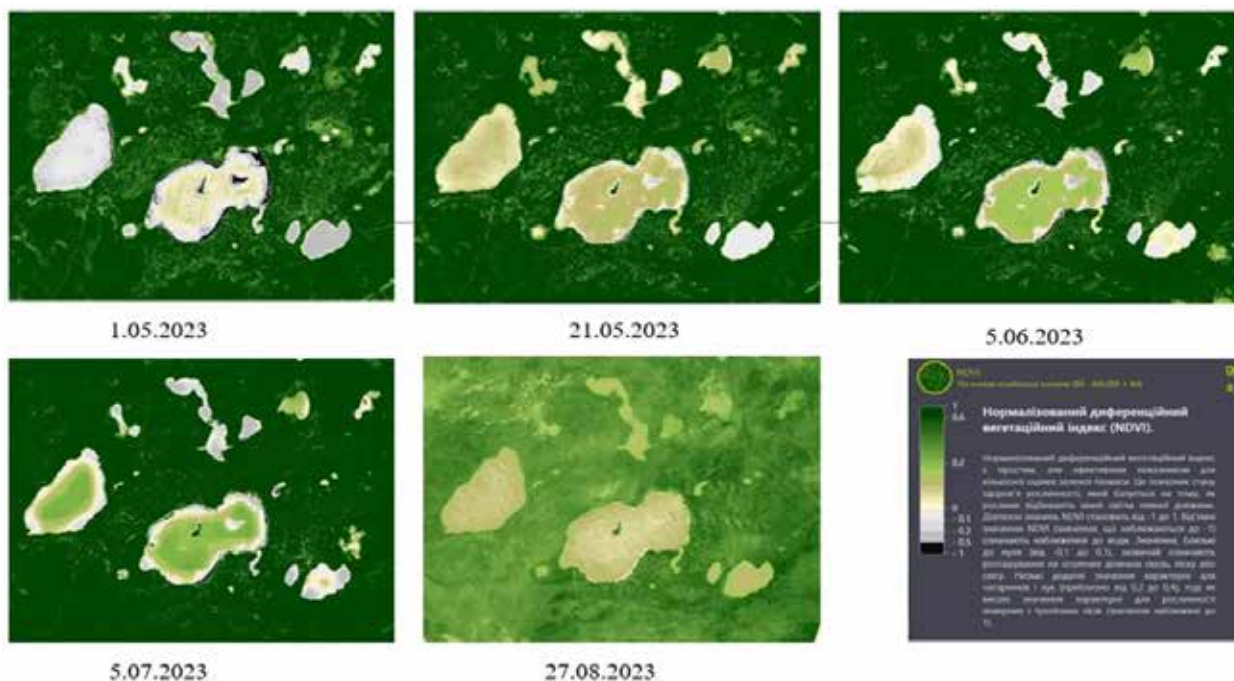


Рис. 1. Фрагменти різночасових супутникових знімків із розрахованими значеннями NDVI для досліджуваних озер

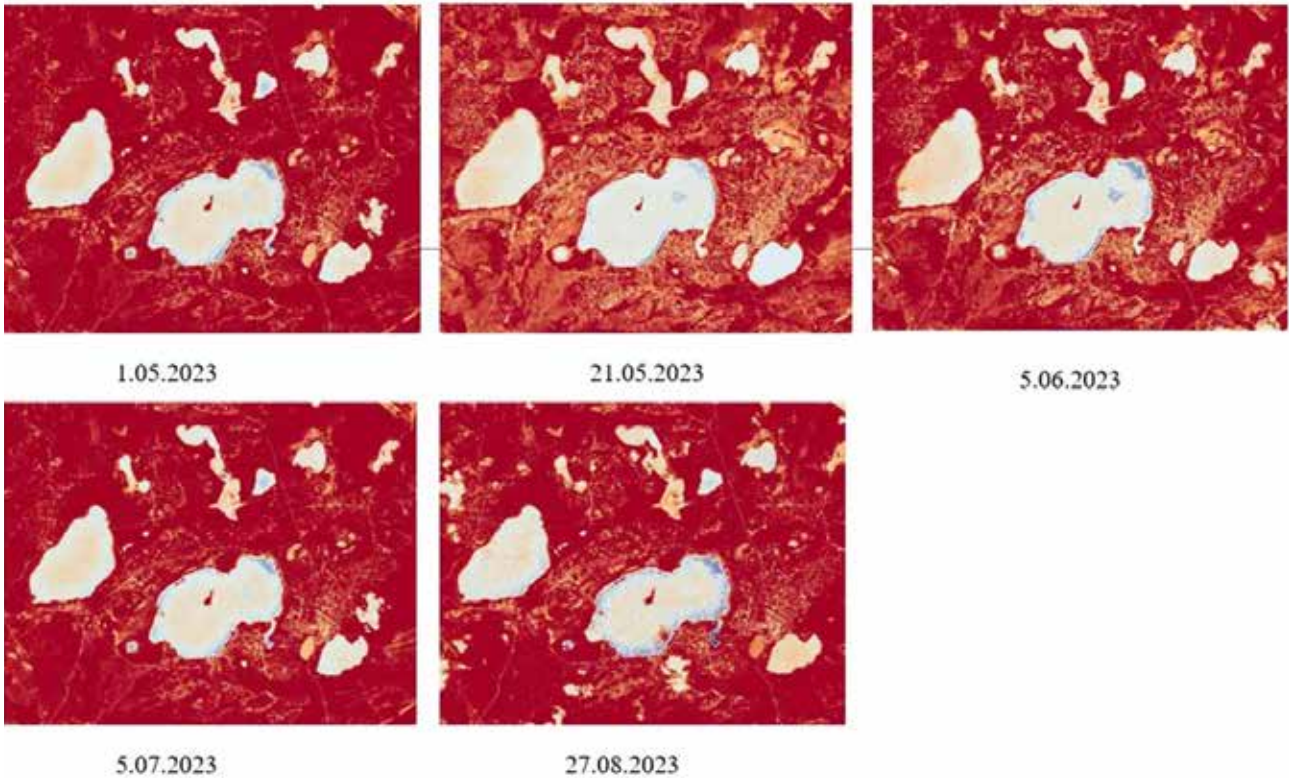


Рис. 2. Фрагменти різночасових супутникових знімків із розрахованими значеннями NDCI для досліджуваних озер

моніторингу евтрофікації озер аналогічні як і для NDVI.

Сезонна динаміка індексу NDVI (див. рис. 3) для різних озер суттєво відмінна. Так, наприклад, для оз. Линовець у внутрішньорічному розподілі максимальні додатні

значення індексу не перевищують 0,3 на початку березня та з кінця червня до кінця серпня. В кінці травня значення індексу досягає -1, що є мінімальним значенням для всіх озер. Протягом червня-початку серпня значення індексу також від'ємні (до -0,5).

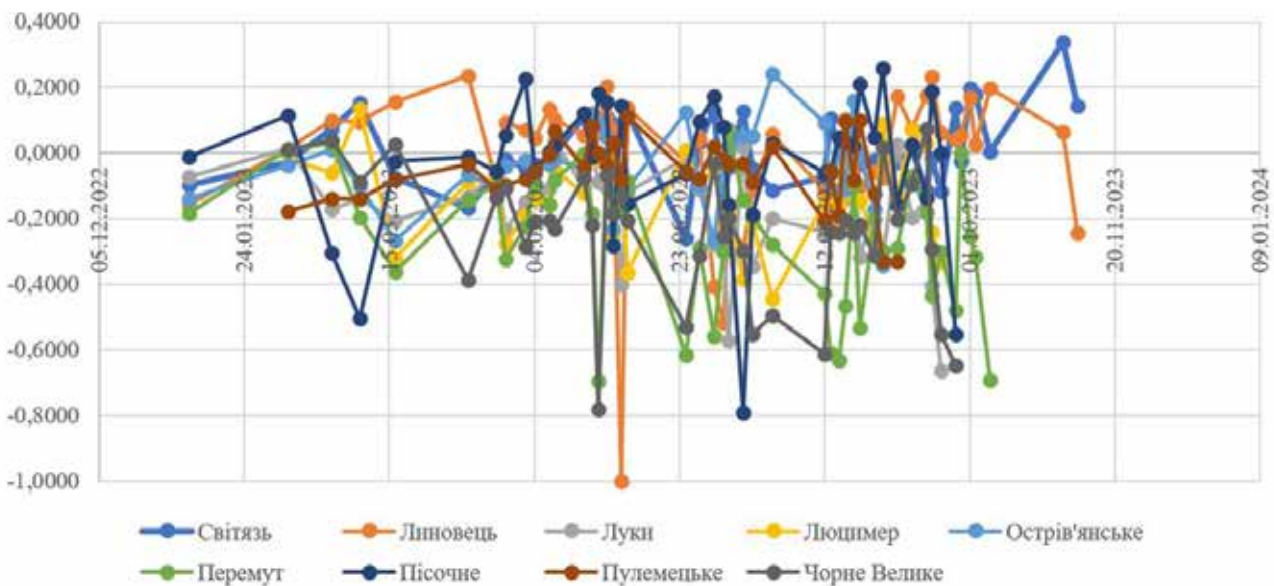


Рис. 3. Порівняльна внутрішньорічна динаміка індексу NDVI досліджуваних озер протягом 2023 р.

Протягом всього іншого часу характерні значення в інтервалі від -0,2 до 0,2.

Для оз. Луки значення індексу протягом року або від'ємні в інтервалі -0,1;-0,6 або близькі до нуля. Додатні значення характерні лише в кінці травня, липня та весь серпень, досягають максимум 0,1. Для озера властива дуже низька варіабельність значень індексу. При цьому відсутні екстремальні значення індексу, характерні для окремих озер, наприклад, для попереднього озера.

Аналогічний характер внутрішньорічної динаміки індексу характерний і для оз. Люцимер. Протягом року переважають від'ємні значення індексу в інтервалі до -0,4. Додатні значення (0,1-0,15) характерні в кінці березня, травня і серпня.

Зовсім інші тенденції властиві для оз. Острів'янське. Від січня і аж до кінця травня характерні значення індексу близькі до 0, вони набувають невеликих від'ємних значень (до -0,2) лише в останній декаді березня. Від початку червня до початку жовтня характерні додатні значення індексу (0,1; 0,2), які перериваються від'ємними значеннями (до -0,2) лише на початку липня і в середині серпня.

Для оз. Перемут властиві вищі значення індексу у внутрішньорічному розподілі, вища їх варіабельність. Від січня до початку серпня характерні невеликі додатні значення індексу (до 0,15), які переривались від'ємними значеннями індексу (-0,1; -0,7) в середині березня, квітня та в кінці травня. З початку серпня і аж до грудня переважають від'ємні значення в інтервалі (-0,6;0).

Схожою є динаміка NDVI для оз. Пісочне. Невеликі додатні значення (0;0,2) характерні від січня до кінця липня, перериваються від'ємними в березні-квітні (до -0,5) і в кінці червня (до -0,2). Від'ємні значення (до -0,8) властиві з кінця липня до кінця серпня, дещо зростаючи до додатних на початку вересня і знов опускаючись до кінця року.

Для оз. Пулемецьке властива чи не найнижча варіабельність значень NDVI серед усіх озер. Від початку січня до кінця травня вони від'ємні, до -0,1. Згодом до кінця жовтня – додатні (0,1;0,2), перериваються в кінці вересня невеликими від'ємними значеннями. Згодом в листопаді вони знов знижуються до значень < 0.

Для внутрішньорічного розподілу індексу у воді оз. Чорне Велике характерні вищі значення індексу та їх амплітуда. Додатні

значення (до 0,05) характерні в лютому, згодом опускаються нижче 0 і лише в жовтні знов набувають додатних значень (до 0,1). Абсолютні мінімуми зафіксовані 25 травня (-0,8), 1 липня (-0,55) і 1 серпня (-0,6).

Внутрішньорічна динаміка індексу для Світязя схожа на Пулемецьке. Додатні значення характерні з лютого (до 0,2), опускаються нижче 0 протягом березня-квітня. До жовтня переважають значення в інтервалі (0;0,2), перериваючись невеликими від'ємними значеннями в червні і липні.

Цікавим є аналіз виявлених тенденцій річного ходу індексу NDVI для окремих озер. За розрахованими значеннями коефіцієнта кореляції річного ходу індексів NDVI досліджуваних озер та озера Світязь, яке вибране еталонним як найбільше і найвідоміше, досліджувані озера можна поділити на 3 групи: з практично відсутнім зв'язком (Перемут, Пулемецьке, Люцимер, Луки, Линовець), слабким додатним (Чорне Велике), слабким від'ємним (Острів'янське, Пісочне). Можна зробити висновок, що на річний хід процесів евтрофікації меншою мірою впливають фізико-географічні умови, а більшою – розміри озер, їх глибина, здатність гідроекосистеми протидіяти евтрофікаційним процесам.

Також розраховані коефіцієнти варіації для річного ходу індексу NDVI окремих озер. Для всіх озер коефіцієнт варіації < 33%, сукупність однорідна. За значеннями коефіцієнта варіації досліджувані озера можна поділити на 3 групи:

Луки, Люцимер, Перемут, Пулемецьке, Чорне Велике – досить близькі, коефіцієнт варіації не перевищує 2%;

Острів'янське, Пісочне і Світязь мають значення коефіцієнта варіації в інтервалі 2–10%;

Линовець – коефіцієнт варіації 22,57%, що свідчить про значну більшу варіацію показників внутрішньорічного ходу NDVI.

Висновки

Встановлено, що рівень евтрофікованості досліджуваних озер не високий. Навіть влітку для більшості озер NDVI не перевищує 0,2, а для окремих (Світязь, Луки, Перемут, Пулемецьке) ще нижчий. Загалом це зумовлено особливостями озер, зокрема, карстовим походженням, значними глибинами та площами водного дзеркала, високою стійкістю їх гідроекосистем, порівняно невисоким рівнем господарського освоєння, перш за все, сільськогосподарського використання території Шацького національного природ-

ного парку. Проте навіть для відносно благополучних в екологічному відношенні озер відчувається вплив глобальної зміни клімату на стан озерних екосистем, в т.ч. і на евтрофікаційні процеси водоймах. Тому дуже важливою є розробка заходів зменшення евтрофікованості та поліпшення гідроекологічного стану Шацьких озер. Вони мають

включати: скорочення надходження біогенних речовин, відновлення природних водоохоронних зон, регулювання рівня води в озерах, збереження біорізноманіття, посилення природоохоронного контролю, адаптацію до наслідків змін клімату, економічні та фінансові механізми природоохоронної діяльності, екологічну освіту.

Список використаної літератури

Арсан О.М., Ситник Ю.М., Горбатюк Л.О., Куля І.Г. Еколого-токсикологічні дослідження озерних екосистем Шацького національного природного парку: органічні токсичні речовини у воді. *Природа Західного Полісся та прилеглих територій*. 2012. № 9. С. 325–328.

Зуб Л.М. Оцінка екологічного стану оз. Світязь за багаторічною динамікою рослинних комплексів аквальної біоти. *Природа Західного Полісся та прилеглих територій*. 2012. № 9. С. 337–343.

Зузок Ф.В. Природа Західного Полісся, прилеглої до Хотиславського кар'єру : монографія. Луцьк : Вежа, 2014. 246 с.

Ільїн А.В. Лімнокомплекси Українського Полісся : монографія: У 2-х т. Т. 1 : Природничо-географічні основи дослідження та регіональні закономірності. Луцьк : РВВ «Вежа» Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки, 2008. 316 с.

Карпюк З.К., Фесюк В.О. Природоохоронні мережі Волинської області. Луцьк : Терен, 2021. 212 с.

Ковальчук С.В. Аналіз рівня антропогенного навантаження на природні комплекси стаціонарними джерелами забруднення Шацького національного природного парку (ШНПП). *Вісник НУВГП*. 2008. № 2 (42). ч. 1. С. 35–42.

Ковальчук С.В. Трансформація водних об'єктів Шацького поозер'я за результатами оцінки антропогенного навантаження на поверхневі води. *The 6th International scientific and practical conference "Multidisciplinary scientific notes. Theory, history and practice" (November 1–4, 2022) Edmonton, Canada. International Science Group*. 2022. С. 42–45.

Коніщук В.В., Христецька М.В. Екологічна оцінка евтрофікації озер біосферного резервату «Шацький». *Агроекологічний журнал*. 2023. № 3. С. 62–70.

Мольчак Я.О. Поверхневі води Волині: колективна монографія. Луцьк : Терен, 2019. 344 с.

Назарук К.М., Хамар І.С. Структура угруповань зоопланктону озера Пісочне Шацького національного природного парку як показник його евтрофікації. *Біологічні Студії*. 2011. Том 5. № 1. С. 131–140.

Романенко В.Д., Жукінський В.М., Оксіук О.П., Яцик А.В. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями. Київ : Символ-Т, 1998. 28 с.

Фесюк В.О. Сучасний екологічний стан та перспективи екологічно безпечного стійкого розвитку Волинської області : колективна монографія. Київ : ТОВ «Підприємство «Ві Ен Ей», 2016. 316 с.

Elser J.J., Bracken M.E.S., Cleland E.E. et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*. 2007. Vol. 10. № 12. P. 1135–1142. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01113.x>.

Gulati R.D., van Donk E. Lake restoration with special reference to lakes in the Netherlands: a review. *Hydrobiologia*. 2002. Vol. 478. № 1–3. P. 73–106. <https://doi.org/10.1023/A:1021092427559>.

NDVI. [Електронний ресурс]. URL: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom=16&lat=51.06328&lng=24.8132&themeId=DEFAULT-24T23%3A59%3A59.999Z> (дата звернення 10.04.2024).

Normalized Difference Chlorophyll Index. [Електронний ресурс]. URL: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/ndci/> (дата звернення 10.04.2024).

Scheffer M. *The Ecology of Shallow Lakes*. London : Chapman & Hall. 2015. 385 p.

Schindler D.W. The enigma of eutrophication: the productivity paradox in lakes. *Israel Journal of Chemistry*. 2012. Vol. 52. № 2. P. 105–116.

Smith V.H., Joye S.B., Howarth R.W. Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. *Limnology and Oceanography*. 2006. Vol. 51. № 1. P. 351–355. https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0351.

Wetzel R.G. *Limnology: Lake and River Ecosystems*. San Diego : Academic Press, 2001. 1006 p.

References (translated & transliterated)

- Arsan, O.M., Sytnyk, Yu.M., Horbatiuk, L.O., & Kuklia, I.H. (2012). Ekolooho-toksykologichni doslidzhennia ozernykh ekosystem Shatskoho natsionalnogo pryrodnoho parku: orhanichni toksychni rehovyny u vodi [Ecological and toxicological studies of lake ecosystems of the Shatsk National Nature Park: organic toxic substances in water]. *Pryroda Zakhidnoho Polissia ta prylehlykh terytorii [Nature of Western Polissia and the surrounding areas]*, 9, 325–328 [in Ukrainian].
- Zub, L.M. (2012). Otsinka ekolohichnoho stanu oz. Svitiaz za bahatorichnoiu dynamikoiu roslynnykh kompleksiv akvalnykh biotopiv [Assessment of the ecological state of Lake Svitiaz by long-term dynamics of plant complexes of aquatic habitats]. *Pryroda Zakhidnoho Polissia ta prylehlykh terytorii [Nature of Western Polissia and the surrounding areas]*, 9, 337–343 [in Ukrainian].
- Zuzuk, F.V. (2014). Pryroda Zakhidnoho Polissya, prylehloho do Khotyslavs'koho kar'yeru : monohrafiya [The nature of Western Polissia, adjacent to the Khotislavsky quarry : monograph]. Luts'k : Vezha [in Ukrainian].
- Ilin, L.V. (2008). Limnokompleksy Ukrainskoho Polissia : monohrafiia: Pryrodnycho-heohrafichni osnovy doslidzhennia ta rehionalni zonomirnosti [Limnocomplexes of Ukrainian Polissya : monograph: Natural and geographical foundations of research and regional patterns]. Luts'k : Vezha Volyn. nats. un-tu im. Lesi Ukrayinky [in Ukrainian].
- Karpiuk, Z.K., & Fesiuk, V.O. (2021). Pryrodookhoronni merezhi Volynskoi oblasti [Nature protection networks of Volyn region]. Luts'k [in Ukrainian].
- Kovalchuk, S.V. (2008). Analiz rivnia antropohennoho navantazhennia na pryrodni kompleksy statsionarnymy dzherelamy zabrudnennia Shatskoho natsionalnogo pryrodnoho parku (ShNPP) [Analysis of the level of anthropogenic load on natural complexes by stationary sources of pollution in the Shatsk National Nature Park]. *Visnyk NUVHP [Bulletin of the NUWGP]*, 2 (42), 35–42 [in Ukrainian].
- Kovalchuk, S.V. (2022). Transformatsiia vodnykh ob'ektiv Shatskoho poozeria za rezultatamy otsinky antropohennoho navantazhennia na poverkhnevi vody [Transformation of water bodies of the Shatsk Lake based on the results of anthropogenic load assessment on surface waters]. *The 6th International scientific and practical conference "Multidisciplinary scientific notes. Theory, history and practice" (November 1-4, 2022) Edmonton, Canada. International Science Group*, 42–45 [in Ukrainian].
- Konishchuk, V.V., & Khrystetska, M.V. (2023). Ekolohichna otsinka evtrofikatsii ozer biosferneho rezervatu «Shatskyi» [Ecological assessment of eutrophication of lakes in the Shatsky Biosphere Reserve]. *Ahroekolohichni zhurnal [Agroecological journal]*, 3, 62–70 [in Ukrainian].
- Molchaka, Ya.O. (2019). Poverkhnevi vody Volyni: kolektyvna monohrafiia [Surface waters of Volyn: a collective monograph]. Luts'k [in Ukrainian].
- Nazaruk, K.M., & Khamar, I.S. (2011). Struktura uhrupuvan zooplanktonu ozera PISOCHNE Shatskoho natsionalnogo pryrodnoho parku yak pokaznyk yoho evtrofikatsii [The structure of zooplankton communities of Lake PISOCHNE in Shatsk National Nature Park as an indicator of its eutrophication]. *Biologichni Studii [Biological Studies]*, 5 (1), 131–140 [in Ukrainian].
- Romanenko, V.D., Zhukinskyi, V.M., Oksiiuk, O.P., & Yatsyk, A.V. (1998). Metodyka ekolohichnoi otsinky yakosti poverkhnevnykh vod za vidpovidnymi katehoriiami [Methodology for environmental assessment of surface water quality by relevant categories]. Kyiv, Symvol-T [in Ukrainian].
- Fesiuk, V.O. (2016). Suchasnyi ekolohichnyi stan ta perspektyvy ekolohichno bezpechnoho stiikoho rozvytku Volynskoi oblasti: kolektyvna monohrafiia [Current ecological state and prospects for environmentally safe sustainable development of Volyn region: a collective monograph]. Kyiv [in Ukrainian].
- Elser, J.J., Bracken, M.E.S., & Cleland, E.E. et al. (2007). Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 10 (12), 1135–1142 <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01113.x> [in English].
- Gulati, R.D., & van Donk E. (2002). Lake restoration with special reference to lakes in the Netherlands: a review. *Hydrobiologia*, 478 (1–3), 73–106 <https://doi.org/10.1023/A:1021092427559> [in English].
- NDVI. [Electronic resource]. URL: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom=16&lat=51.06328&lng=24.8132&themeId=DEFAULT-24T23%3A59%3A59.999Z> (access date 10.04.2024) [in English].
- Normalized Difference Chlorophyll Index. [Electronic resource]. URL: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/ndci/> (access date 10.04.2024) [in English].

Scheffer, M. (2015). *The Ecology of Shallow Lakes*. London : Chapman & Hall. [in English].

Schindler, D.W. (2012). The enigma of eutrophication: the productivity paradox in lakes. *Israel Journal of Chemistry*, 52 (2), 105–116 [in English].

Smith, V.H., Joye, S.B., & Howarth, R.W. (2006). Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. *Limnology and Oceanography*, 51 (1), 351–355 https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0351 [in English].

Wetzel, R.G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems*. San Diego : Academic Press, 1006 [in English].

Отримано: 26.04.2024

Прийнято: 06.05.2024



УДК 574+523.4

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.30>

ПОТЕНЦІАЛ СПОНТАННОГО ТЕРАФОРМІНГУ ЛАНДШАФТІВ СУХОДОЛУ З ПОЗИЦІЙ СУЧАСНОЇ ТЕОРІЇ ДИНАМІКИ ЕКОСИСТЕМ

І. В. Хом'як¹, О. І. Хом'як²

Стаття присвячена можливостям природного відновлення екосистем, в тому числі поза межами Землі, в залежності від умов середовища. Метою дослідження є прогнозування потенціалу спонтанного тераформінгу в змодельованих умовах незаселеного біотою субстрату. Відповідно до мети було поставлено такі завдання: змодельовати основні параметри ймовірних едафічних умов незаселеного субстрату, встановити основні вектори заселення та потенціал трансформації такого субстрату біотою, визначити тератрансформаційний потенціал біоти на різних первинних субстратах. Динаміка екосистем, яка призводить до змін середовища, є процесом тераформінгу, під час якого умови середовища на поверхні планети наближаються до оптимуму необхідного для біоти на певному етапі еволюції. Така динаміка не є жорстко детермінованою та залежна від зовнішніх чинників, в тому числі антропогенного та від ендекогенетичного та сингенетичного потенціалу території. Вона рухається в бік з максимальних значень об'ємів надземної фітомаси та зростання її віку, доступних в певній кліматичній зоні та на певному етапі еволюції. Цей процес може бути, як керований людиною, так і спонтанний. Спонтанний тераформінг є автогенною сукцесією із наближенням едафічних умов до кліматичного оптимуму. Він постійно відбувається як самостійно, так і паралельно із цілеспрямованими діями людини. У залежності від субстрату можливі декілька варіантів спонтанного тераформінгу, які є автогенною сукцесією із переходом до ендекогенетичного катастрофічного клімаксу. Він триватиме, поки не відбудуться зміна мінеральної частини едафотопу із подальшим її наповненням біогенними елементами. Кліматичний клімакс можливо в вузькій амплітуді показників едафічних факторів та в присутності банку насіння чи вегетативних зачатків рослин чи насінневої діаспори або проникнення вегетативних частин рослин за її екосистеми. За умови константності в зоні оптимуму показників інших факторів, існує залежність між розмірами часточок мінеральної основи ґрунту і потенціалом спонтанного тераформінгу. Для земної біоти оптимальними показниками є часточки розміром від 0,005 мм до 0,05 мм, що відповідають еоловому лесу.

Ключові слова: сукцесія, едафотоп, катастрофічний клімакс, космічна експансія.

¹ кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: khomyakivan@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0080-0019

² аспірант Інституту маркшейдерії та геодезії
(Фрейбергський Університет гірництва і технологій, м. Фрейберг)
e-mail: oxanakhomiak@gmail.com
ORCID: 0009-0006-6764-6545

THE POTENTIAL OF SPONTANEOUS TERRAFORMING TERRESTRIAL LANDSCAPES FROM THE STANDPOINT OF THE MODERN THEORY OF ECOSYSTEM DYNAMICS

I. V. Khomiak, O. I. Khomiak

The article is devoted to the possibilities of natural restoration of ecosystems, including beyond the borders of the Earth, depending on environmental conditions. The purpose of the study is to predict the potential of spontaneous terraforming in simulated conditions of a substrate not inhabited by biota. In accordance with the goal, the following tasks were set: to model the main parameters of probable edaphic conditions of an uninhabited substrate, to establish the main vectors of settlement and transformation potential of such a substrate by biota, to determine the teratransformation potential of biota on various primary substrates. The dynamics of ecosystems, which lead to changes in the environment, is a process of terraforming, during which the surface of the planet acquires the appearance corresponding to a certain stage of the evolution of biota. Such dynamics are not rigidly determined and depend on external factors, including anthropogenic, endo-echogenetic and syngenetic potential of the territory. It moves in the direction of the maximum values of above-ground phytomass volumes and growth of its age available in a certain climatic zone and at a certain stage of evolution. This process can be both human-controlled and spontaneous. Spontaneous terraforming is an autogenic succession with edaphic conditions approaching the climactic optimum. It constantly occurs both independently and in parallel with the purposeful actions of a person. Depending on the substrate, several variants of spontaneous terraforming are possible, which are an autogenic succession with a transition to an endoechogenetic catastrophic climax. It will last until the change of the mineral part of the edaphotope with its subsequent filling with biogenic elements. Under the condition of constancy in the zone of the optimum indicators of other factors, there is a dependence between the particle sizes of the mineral base of the soil and the potential of spontaneous terraforming. For terrestrial biota, the optimal indicators of soil mineral base are particles with a size of 0.005 mm to 0.05 mm, which correspond to aeolian loess.

Key words: successions, edaphotope, catastrophic climax, space expansion.

Вступ

Живі організми мають гнучкі адаптаційні стратегії, що дозволяє їм пристосовуватися, до великої різноманітності середовищ. Завдяки діяльності людини вони отримали можливість переміщуватися на значні відстані та випробувати свої адаптаційні спроможності в нових умовах. Це в свою чергу запускає ланцюги кількох важливих процесів. Серед них, розширення території зайнятої живими істотами, нові напрямки та рішення еволюції видів, загрози для аборигенної біоти, позитивна або негативна для людини трансформація довкілля. Такі переміщення відбуваються, як на поверхні нашої планети, так і за її межами. Це в свою чергу породжує ризики для біорізноманіття в межах окремих ділянок нашої біосфери та ряд етичних й екологічних проблем в космічному просторі, який ми освоємо (Chon-Torres, 2018).

З іншого боку, таке спонтанне перенесення біоти, дозволяє відновлювати природну рослинність на порушених територіях нашої планети. Не залежно від того чи це порушення є природним (вулкани, тектонічні рухи, катастрофічні атмосферні явища), чи антропогенним (гірнична

діяльність, забудова), спонтанне заселення відновлює природні екосистеми без залучення додаткових людських зусиль і засобів (Harbar, 2021). Це дозволяє зробити процес відновлення природних екосистем більш ефективним і направити вивільнені ресурси на інші напрямки.

У наш час спостерігається нова активізація освоєння космічного простору, яка супроводжується перенесенням біоти за межі біосфери. Це стосується не лише орбітальних станцій, а й міжпланетних місій (Onyschuk & Khomiak, 2022). Ми вже зустрічаємо організовану біоту на цих об'єктах і ще частіше спостерігаємо в експериментах за її потенціалом поширення та адаптації. Місячна гонитва та активні дослідження Марсу, в яку вклучилися провідні космічні гравці, робить цю проблему надзвичайно актуальною. Тут можливими є чотири аспекти. Перший пов'язаний із поширенням біоти небезпечною для людини. Другий – із функціонуванням позаземних плантацій, які забезпечуватимуть жителів станцій продуктами харчування, киснем та іншими корисними речовинами. Третій – із проблемами пошуку позаземного життя на фоні поширення в зоні пошуку земних форм.

Четвертий – загроза для аборигенної біоти, знання про яку є фундаментальними джерелами до розкриття сутності життя у Всесвіті загалом. На цьому етапі надзвичайно важливим є прогнозування потенціалу певних територій для спонтанного поширення живих організмів, так і для корекції дослідницьких територій в пошуках позаземного життя (Хом'як, 2021).

Автогенна динаміка екосистем залежна від обмеженого числа груп факторів, хоч і не є жорстко детермінованою. На її темпи і напрямки впливають зовнішні чинники, в тому числі антропогенні, ендоекогенетичний потенціал та сингенетичні можливості. У більшості випадків, автогенна динаміка фототрофних екосистем призводить до збільшення об'ємів надземної фітомаси та зростання її віку (Khomiak et al., 2019). Це відбувається до моменту досягнення максимальних значень доступних в певній кліматичній зоні та на певному етапі еволюції. Точка, в якій вектор динаміки екосистем може досягнути до еволюційно-кліматичного бар'єру, буде клімаксічним атрактором, до якого спрямований саморозвиток усіх екосистем. Якщо вплив одного із трьох груп чинників буде настільки сильним, що зміни надземної фітомаси і її віку припиняться, то екосистема перебуватиме в стані, описаному Юджином Одумом як катастрофічний клімакс (Odum, 1971).

Зовнішні впливи чи внутрішня реорганізація екосистеми, що ведуть до зупинки накопичення фітомаси та збільшення її віку, спричиняють тимчасову зупинку динаміки. Вона запускається одразу, після того, як дигресійний фактор зникає. Складнішими і більш тривалими в часі є блокування процесів ендоекогенезу та сингенезу. Максимальні значення надземної фітомаси та її віку можливі лише в вузькому діапазоні показників едафічних факторів. Насамперед, мова іде про багаторічний режим вологості та загальний сольовий режим, які варіюють досить сильно. Наприклад для території Українського Полісся оптимальні показники цих факторів дорівнюють 11,77–12,37 (HD) і 6,2–6,5 (SL) балів за шкалою Дідуха-Плюти відповідно (Khomiak et al., 2019). Доки едафотоп, який заселяється природною біотою, не досягне цих значень, кліматичний (енергетичний) клімакс неможливий. Саме тому, такі умови середовища називаються клімаксічним оптимумом. Взаємодія біоти із навколишнім середовищем у більшості

випадків веде до наближення із клімаксічним оптимумом. Це виникло в результаті тривалої еволюції екосистем. Лише у випадку, коли ми маємо справу із досить новими і незвичними формами заселення біоти (наприклад, вплив інвазійних видів трансформерів або постійне насадження монокультур) оптимізація едафічних умов не відбувається. Зміни в едафотопі відбуваються за рахунок появи в комплексі органічних речовин, які синтезовані біотою (наприклад, гумусу) та зміни механічного складу (впливи на ґрунтові капіляри, зміна механічного складу, утворення мінерально-органічних комплексів). Потрапляння в ґрунти органічних речовин та зміни в хімічному чи фізичному складі здебільшого сприяють наближенню до клімаксічного оптимуму.

Однак, для того щоб зростала надземна фітомаса та її вік паралельно із покращенням умов середовища, необхідною є заміна угруповань автотрофів із домінуванням одного типу біоморф на інший. Це відбувається за рахунок наявного в ґрунті банку насіння та вегетативних зачатків або його занесення зовні (Harbar et al., 2023). Відсутність можливості появи видів необхідних для наступних стадій сукцесії призводить, до зупинки динаміки – сингенетичного катастрофічного клімаксу. Ще однією причиною такої зупинки, може бути формування угруповання із зависокою конкурентоздатністю в порівнянні із тим, яке має вищу надземну фітомасу і вік. Зазвичай, таке відбувається в угрупованнях інвазійних видів (Khomiak et al., 2019).

Фітомаса та її вік є ознаками не лише стану динаміки екосистем, а й глибини тераформінгу. Тут під тераформінгом ми розуміємо спонтанний або керований процес перетворення непридатної для життя або позбавленої живих організмів ділянки планети. В традиційному розумінні це поняття трактують досить вузько – керований процес перетворення незаселеної живими організмами планети на заселену земними видами. З точки зору астроєкології це не зовсім логічне звуження поняття. Принципи, за якими відбувається заселення незайнятої території не змінюються. Це стосуватиметься, як інших планет, так і будь яких позаземних об'єктів чи порушених ділянок на Землі (Khomiak & Vasylenko, 2023). При цьому, спонтанний тераформінг весь час супроводжуватиме цілеспрямовану діяльність людини. В такому випадку діяль-

ність людини впливатиме на динаміку не обов'язково у протилежному від клімаксичного атрактора напрямку.

Метою дослідження є прогнозування потенціалу спонтанного тераформінгу в змодельованих умовах незаселеного біотою субстрату. Відповідно до мети було поставлено такі завдання:

- Змодельувати основні параметри ймовірних едафічних умов незаселеного субстрату;
- Встановити основні вектори заселення та потенціал трансформації такого субстрату біотою;
- Визначити тератрансформаційний потенціал біоти на різних первинних субстратах.

Матеріал і методи

Матеріалами дослідження є геоботанічні описи зроблені в 2004–2023 роках на території Українського Полісся, в районі гірничих промислових об'єктів та перелогів. Дослідження проводилися маршрутно-експедиційними, напівстаціонарними та стаціонарними методами. Класифікація рослинних угруповань виконувалася за принципами школи Браун Бланке (Westhoff & Maarel, 1973), а їхня ідентифікація з використанням «Продромусу рослинності України» (Дубина та ін., 2019). Встановлення величини чинників середовища здійснювалося із використанням методів синфітоіндикації. Нами використовувалась уніфікована шкала Дідуха-Плюти для абіотичних факторів (Дідух і Плюта, 1994), шкала Дідуха-Хом'яка для антропогенного фактора та оригінальна шкала бази даних EcoDBase для встановлення показника динаміки. Для синфітоіндикаційного аналізу застосовувалася програма Simargl 1.12. Для моделювання динаміки екосистем використовувалась програмне середовище Python.

Дані про субстрат було отримано із матеріалів Звітів оцінки впливу на довкілля гірничих підприємств, великомасштабних мап ґрунтів та за допомогою гіперспектральної зйомки рихлих осадових порід (Khomiak & Benndorf, 2021). Аналіз розмірів мінеральних часточок та деякі параметри їхньої хімічної будови здійснювалися за допомогою програми штучного інтелекту на основі пакету програм Python (Khomiak et al., 2024)

Результати

За нашими спостереженнями, в залежності від субстрату можливі декілька варіантів спонтанного тераформінгу, які з точки зору теорії динаміки є автогенною сукцесією із

переходом до ендоекогенетичної зупинки (катастрофічного клімаксу). Гіпотетично, ця зупинка триватиме до тих пір, поки не відбудуться зміна мінеральної частини едафотопу та із подальшим її наповненням біогенними елементами. В умовах Землі та за її межами, якщо відкинути кліматичні фактори, процес спонтанного тераформінгу буде повністю залежати від едафотопу. Земна біота може зіткнутися із труднощами, які не здатна буде подолати. У такому випадку, її поширення буде неможливе, а отже процес тераформінгу буде відсутній. Однак, як показують останні дослідження, навіть на сусідні із нами космічні об'єкти може проникати земна біота і розвиватися в їхньому середовищі. Мова йде про одноклітинних екстремофілів. Більшу частину часу вони будуть знаходитися в стані анабіозу, але в моменти, коли умови тимчасово покращуватимуться будуть тимчасово активізувати процес розмноження. В земних умовах вони практично першими з'являються на порушених ділянках. Якщо потрапляють на кристалічні монолітні породи із поверхнями близькими до вертикальних, то вони залишаються тут єдиними представниками біоти протягом тривалого часу (рис. 1). Разом із тим, слід зазначити, що у таких умовах вони не здатні швидко і у великих обсягах продукувати фітомасу і змінювати едафотоп. Тому їхнє проникнення на іншу планету розтягне її тераформінг на сотні мільйонів років. В ідеальних умовах поліських ґрунтів вони продукують за даними М. М. Голлербаха та Е. А. Штини до 130–133 кг/га. Це лише 0,007–3% надземної фітомаси інших автотрофів цих екосистем. Це може зашкодити дослідницьким місіям, направленим на пошуки позаземного життя. Спонтанне заселення одноклітинними організмами приміщень космічних станцій ведеться набагато активніше і вже може становити загрозу людям завдавати шкоду їхнім плантаціям культурних рослин.

Оскільки, серед одноклітинних автотрофних екстремофілів значна частка ціанобактерій та зелених водоростей, то існує ймовірність їхньої зустрічі із ліхнеофільними грибами, із подальшим утворенням лишайників. Лишайникові угруповання потребують умов, які ближчі до клімаксичного оптимуму, але здатні створювати більші запаси надземної фітомаси та здійснювати глибшу тератрансформацію. За можливостями лишайників різних біоморф створювати запаси фітомаси, їх можна виши-

кувати у такий ряд: накипні, листуваті, куцисті. Накипні або кіркові біоморфи здатні закріплюватися на різних монолітних поверхнях. Вони є наступною після водоростевої стадії автогенної сукцесії (див. рис. 1). Оптимальний баланс освітлення та зволоження дозволяє перейти до домінування більш продуктивних листуватих форм. Перехід до куцистої форми є ще більш складним. В земних умовах вони не часто займають епілітні або епіфітні субстрати. Підтримання життєдіяльності такого організму вимагає ще більшої кількості вологи. Куцистим лишайникам необхідні специфічні мікрокліматичні умови, коли світла буде достатньо для фотосинтезу або рихлий субстрат в при поверхневому шарі якого затримуватиметься волога. Оскільки, для формування таких угруповань необхідні специфічні набори видів (ліхнеофільні гриби, водорості, ціанобактерії бажано із здатністю до фіксації азоту, тощо), то їхнє спонтанне виникнення на віддалених космічних об'єктах є малоімовірними. Однак існуватиме пряма залежність між цією ймовірністю і частотою відвідування планети земними апаратами.

Наявність крупнозернистого субстрату, навіть із невеликою кількістю необхідних

мінеральних речовин (4–5 балів за шкалою Дідуха-Плюти) та багаторічним режимом зволоження 9–10 балів, дозволяє оселитися тут угрупованням мохів та екстриміофільних вищих судинних рослин. Переважено це мохи класів *Bryopsida* та *Polytrichopsida*, а також вищі судинні рослини родин *Caryophyllaceae* та *Poaceae*. Наприклад, на території Центрального Полісся вони формують угруповання *Nardetea strictae* Rivas Goday et Borja Carbonell in Rivas Goday et Mayor López.1966, *Koelerio glaucae-Corynephoretea canescentis* Klika in Klika et Novak 1941 та *Sedo-Scleranthea* Br.-Bl. 1955. Едафічні умови необхідні до такого типу оселищ можуть бути створені від початку або з'явитися в результаті тривалого тераформінгу зі сторони ціанобактерій, суходільних одноклітинних водоростей та лишайників. Порушені земні екосистеми, наприклад в районі кар'єрів, зазвичай вже мають такі умови і ця стадія стартує одразу після послаблення дії зовнішнього фактора. Оскільки, в таких екосистемах може формуватися до 2 т/га надземної фітомаси, то їхній тераформінговий потенціал у 10–15 раз потужніший ніж у найпродуктивніших бактеріально-водоростевих та лишайникових екосистем.

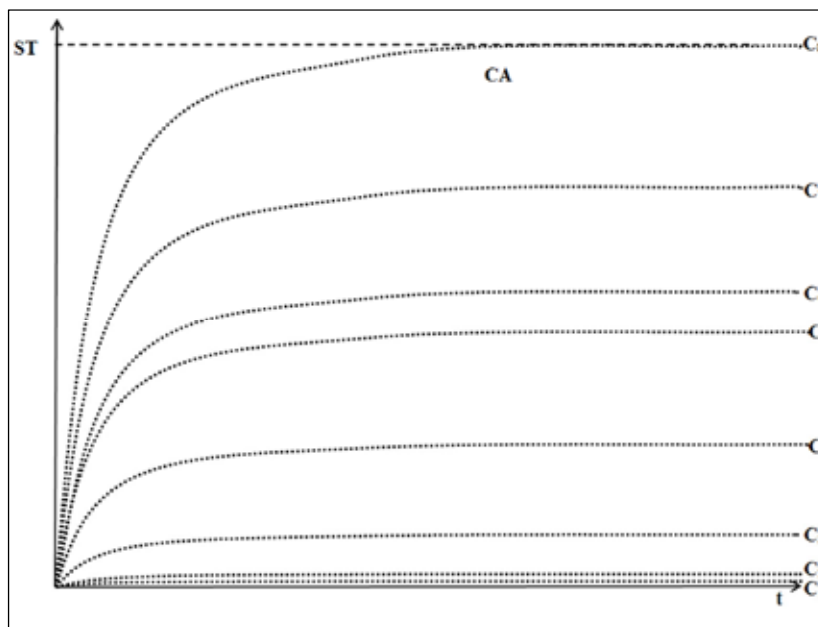


Рис. 1. Варіанти спонтанного тераформінгу в різних едафічних умовах.

Умовні позначення: ST – показник природної динаміки, t – час, C1 – формування водоростево-бактеріальних екосистем, C2 – формування лишайникових екосистем, C3 – формування мохово-злакових екосистем, C4 – формування екосистем злаковників, C5 – формування екосистем похідних лісів, C6 – формування екосистем екстриміофільних корінних лісів, C7 – формування корінних лісів, C8 – формування клімаксічних лісів, CA – клімаксічний аттрактор

Наступні стадії динаміки екосистем, такі як стадія злаковників, похідних лісів, екстриміфільних корінних лісів, типових корінних лісів та клімаксічних лісів, практично неможливі без попереднього тераформінгу. Для забезпечення їхнього функціонування необхідно більш стале забезпечення оптимальною кількістю вологи та мінеральних речовин. Це можливе не лише за наявності води та солей у ґрунті, а й органічних макромолекул, які регулюють їхній рух крізь нього. Такі органічні макромолекулярні комплекси формуються лише за рахунок потрапляння в первинний ґрунтовий субстрат відмерлих решток живих організмів. Коли умови починають наближатися до оптимальних, то в межах кожної групи можуть формуватися свої екосистеми, автотрофні блоки яких мають земні аналоги. Наприклад на території Полісся, в екосистем злаковників ними будуть угруповання порядку *Gaietalia veri* Mirk. et Naum. 1986 (класу *Molinio-Arrhenatheretea* R. Tx 1937), для похідних лісів асоціації *Salicetum capreae* Schreier 1955 (класу *Robinietea* Jurco ex Hadac et Sofron 1980), для екстриміфільних корінних лісів асоціації *Cladonio-Pinetum* Juraszek 1927 (класу *Vaccinio-Piceetea* Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939), для типових корінних лісів це всі інші класи лісової рослинності (*Quercetea robori-petraeae* Br.-Bl. et Tüxen ex Oberdorfer 1957, *Vaccinio-Piceetea*, *Carpino-Fagetea sylvaticae* Jakucs ex Passarge 1968, *Quercetea pubescentis* Doing Kraft ex Scamoni et Passarge 1959, *Alnetea glutinosae* Br.-Bl. et Tüxen ex Westhoff, Dijk et al. 1946, *Pyrolo-Pinetea* Korneck 1974) і для клімаксічних лісів пралісові угруповання класу *Carpino-Fagetea sylvaticae*.

За умови константності в зоні оптимуму показників інших факторів можна помітити залежність між розмірами часточок мінеральної основи ґрунту і можливостями тераформінгу (рис. 2). В реальній природній обстановці ми спостерігаємо суміш часточок різного розміру. Певний тип субстрату визначається за їхньою домінуючою групою. Разом із тим ми не розглядаємо тут ґрунти на основі певного типу механічних часточок, а лише виходимо на денну поверхню осадкових порід. В земних умовах це відбувається в районі гірничих розробок, бойових дій, рухів земної кори та дії водяної ерозії. Інопланетні субстрати априорі мають бути їхніми аналогами.

За нашими спостереженнями максимальні темпи приросту надземної фітомаси

та найвищі її показники спостерігаються на лесових гірських породах. Такий субстрат найкраще поєднується із відмерлою органікою, а умови едафотоп на його основі наближається до клімаксічного оптимуму. В таких умовах за 10 років наземна фітомаса перевищує 60 т/га, а показники динаміки (ST) досягають 12 балів. В інших едафічних умовах розвиток екосистем досягає певного рівня і залишається в ньому в стані катастрофічного клімаксу. Тобто, коли розміри часточок субстрату помітно більші або менші за діапазон від 0,005 мм до 0,05 мм, тоді процеси тераформінгу сповільнюються. Дрібні мінеральні часточки, за допомогою переміщення із вітром і водою, прикривають менш придатні субстрати. Розміри таких часточок залежать від сили вітру. Слабкі та помірні вітри в основному переносять лес, більш потужні крупніші піски. Вода здатна переносити, як дуже дрібні часточки мулу та глини, так і переміщувати гравій. Накопичення поверх малопритатних до тераформінгу порід часточок близьких до лесу дозволяє прискорити його. Те саме відбувається, коли дрібні часточки заповнюють щілини між крупними уламками кристалічних порід. Таким чином, подальша динаміка буде пов'язана саме із дрібнозернистим субстратом, а не вищезгаданими уламками.

Обговорення

Моделювання динаміки екосистем на первинних субстратах має кілька напрямків прикладного та теоретичного характеру. По перше, це прогнозування та розробка алгоритмів регулювання відновлення рослинності після порушень природного та антропогенного характеру на Землі. По друге, це спроба передбачити та запобігти небажаним наслідкам спонтанного перенесення організмів за межі Землі. По третє, це планування тераформінгу в процесі космічної експансії.

За своєю фундаментальною суттю, земні процеси відновлення екосистем не дуже відрізняються від позаземних. Єдина різниця в тому, що тут ми маємо велику кількість організмів, які добре адаптовані до земного середовища. За межами нашої планети усі живі організми не є аборигенними і випадково або навмисно переміщують людиною. Їхня адаптованість позаземних умов середовища не пов'язана із тривалим еволюційним процесом у ньому. Разом із тим, наші спостереження за порушеними ґрунтами в районі гірничих підприємств, дозволяють

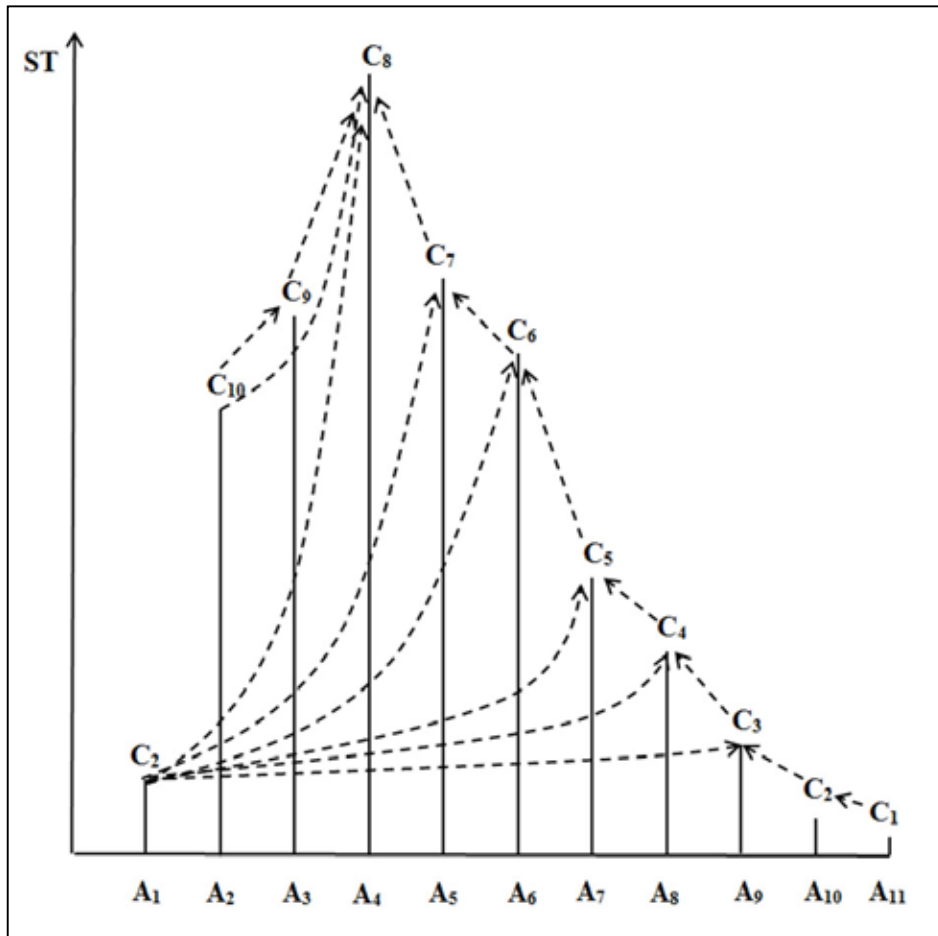


Рис. 2. Варіанти спонтанного тераформінгу в різних едафічних умовах на прикладах кар'єрів та ярів Українського Полісся. Умовні позначення: ST – показник природної динаміки, A₁ – глинисті сланці (d < 0,001 мм, спресований із пористістю 1-3%), A₂ – глина (d ≈ 0,001 мм), A₃ – суглинок (суміш d ≈ 0,005мм – 40%, d ≈ 0,002 мм – 40%, d < 0,002 мм – 20%), A₄ – лес (d від 0,005 мм до 0,05 мм – 60%), A₅ – пісок (d ≈ 0,1-0,5 мм), A₆ – крупнозернистий пісок (d 0,5-3 мм), A₇ – дрібний гравій (d ≈ 3-5 мм), A₈ – крупний гравій (d ≈ 5-10 мм), A₉ – дрібні уламки каменю (d ≈ 1-10 см), A₁₀ – крупні уламки каменю (d ≈ 0,1-1,5 м), A₁₁ – крупні камінні моноліти (d > 1,5 м), C₁ – формування водоростево-бактеріальних екосистем та оселищ накипних і листових лишайників, C₂ – формування лишайникових та мохових екосистем, C₃ – формування мохово-злакових екосистем, C₄ – формування екосистем екстриміфільних злаковників, C₅ – формування злаково-чагарничкових екосистем, C₆ – формування екосистем екстриміфільних корінних лісів, C₇ – формування корінних лісів, C₈ – формування клімаксихних лісів, C₉ – формування екосистем похідних лісів, C₁₀ – формування похідних лісів та чагарників

не лише вибудовувати загальні теорії динаміки екосистем, а й проектувати спостережувані закономірності на ймовірні процеси спонтанного тераформінгу.

Незважаючи на те, що ми вважаємо проблему колонізації інших планет досить віддаленою, небезпечні наслідки спонтанного тераформінгу стали щоденною реальністю. Мова іде про перенесення на космічні станції мікроорганізмів, здатних розселятися та

розмножуватися в їхніх межах (Carte et al., 2023). Незважаючи на численні запобіжні заходи бактеріальне забруднення космічних апаратів достатнє навіть для класичних бактеріальних сукцесій із власним катастрофічним клімаксом. Нещодавно було досліджено серветки для підлоги, на яких знайшли численних організмів, включаючи хемотрофів із фіксацією нітрогену. Якщо активність переміщення людей та вантажів

зростатиме разом із зростанням різноманітності субстратів, то тут з'являтимуться більш складні угруповання. Вони можуть становити загрозу, як особисто для користувачів станції, так і для біоти, яку вони вирощують. Цю проблему намагаються вирішити у різні способи, тому що традиційні методи захисту рослин в умовах мікрогравітації в замкнених приміщеннях надзвичайно небезпечні. Дослідники підтверджують підвищені ризики зараження популярних овочевих культур (Totline et al., 2023; Totline et al., 2024). Для крупних віддалених поселень це буде серйозною проблемою, пов'язаною із втратою харчових ресурсів.

Інвазії земних організмів на досліджувані космічні об'єкти становлять загрозу для «чистоти» отримуваних результатів пошуків позаземного життя. Експерименти показують, що багато представників земної біоти легко адаптуються до позапланетних умов. Наприклад, міжнародною дослідницькою групою було встановлено чотири види бактерій здатних вижити в умовах Марсу (Zaccaria et al., 2024). Їхнє спонтанне проникнення та поширення на цю планету зведе нанівець усі пошуки позаземного життя. Разом із тим, це буде серйозним порушенням принципів біоетики, адже земна біота може становити загрозу аборигенній. Зазвичай, ми розглядаємо етичність людської діяльності за межами Землі лише в аспекті прямої загрози людині. Наприклад, через загрозу космічним польотам і життю на поверхні планети збільшенням антропогенного засмічення простору (Taylor & Newman, 2018). Однак, загроза знищення інопланетної біоти будь якого рівня розвитку теж є аморальним вчинком (Craven et al., 2021).

У більш віддаленій перспективі, коли людство матиме намір тераформувати незаселену планету, воно зіткнеться із рядом проблем, пов'язаних із ефективністю, надійністю та швидкістю цієї процедури. Використання для неї екстремофілів, навіть генномодифікованих, не вирішить ці проблеми. Наприклад, лишайники, як і деякі автотрофні одноклітинні організми, є досить витривалими, щодо екстремальних умов середовища, тому можна припустити, що первинне вселення із спонтанним тераформінгом може здійснюватися ними одночасно. Вони займатимуть відмінні за едафічними умовами, насамперед за механічним складом субстрату умови. Однак, їхні спроможності перетворення поверхні планети досить слабкі. Навіть навмисне розсіювання

клітин цих організмів не здатне значно прискорити цю процедуру. Для швидкого перетворення планети потрібно заселяти великі площі екосистемами із високопродуктивними автотрофами. Для підвищення ефективності тераформінгу потрібно поєднувати цілеспрямоване заселення поверхні планети із спонтанним тераформінгом. Отже, на територіях, де можливе швидке самовідновлення не варто знищувати спонтанну рослинність і створювати штучні плантації.

Оскільки, для тераформінгу потрібні, і умови середовища, і набори насіння, то його процедуру можна скоротити, використовуючи контрольований варіант для формування банку насіння. Це насіння дозволить перехід до більш високопродуктивних екосистем і до прискорення спонтанного тераформінгу. Найбільш ефективним є комбінований підхід із орієнтуванням на ділянки із відмінними едафічними умовами. На найбільш придатних ділянках раціонально створити ядра біорізноманіття. На тих, що наближаються до них та мають рихлий субстрат можна сформувати мохово-злакові екосистеми. Заселення решти планети відбуватиметься спонтанно за рахунок бактеріально-водоростевих та лишайникових екосистем. Спонтанний тераформінг не можливо буде виключити в жодному випадку, якщо в межах планети чи іншого позаземного об'єкту є умови для виживання земних організмів та контакт із об'єктами, що прибули із Землі. Знання про його механізми дозволять уникнути не бажаних змін в довкіллі або використати цей спонтанний процес для більш швидкого, ефективного та надійного тераформінгу планети.

У земних умовах, під час відновлення екосистем після порушень чи рекультивациї теж будуть присутні спонтанне заселення та спонтанний тераформінг. Намагання під час рекультивациї проігнорувати ці закономірності часто закінчуються зниженням її якості або й повним провалом. Разом із тим, використання спонтанних процесів відтворення природних екосистем та перетворення середовища біотою, дозволяє не лише прискорити ці процеси, а й витратити на них менше зусиль та ресурсів.

Висновки

Динаміка екосистем, яка призводить до змін середовища, є процесом тераформінгу, під час якого поверхня планети набуває вигляду відповідного певному етапу еволюції біоти. Така динаміка не є жорстко детермінованою та залежна від зовнішніх чин-

ників, в тому числі антропогенних, а також від ендоекогенетичного та сингенетичного потенціалу території. Вона рухається в бік з максимальних значень об'ємів надземної фітомаси та зростання її віку доступних в певній кліматичній зоні та на певному етапі еволюції. Цей процес може бути, як керований людиною, так і спонтанний. Спонтанний тераформінг є автогенною сукцесією із наближенням едафічних умов до кліматичного оптимуму. Він постійно відбувається самостійно або паралельно із цілеспрямованими діями людини.

У залежності від субстрату можливі декілька варіантів спонтанного тераформінгу, які є автогенною сукцесією із переходом до ендоекогенетичного катастро-

фічного клімаксу. Він триватиме, поки не відбудуться зміна мінеральної частини едафотопу із подальшим її наповненням біогенними елементами. Кліматичний клімакс можливий в вузькій амплітуді показників едафічних факторів та в присутності банку насіння або вегетативних зачатків рослин чи їхньої діаспори яка проникає на територію за меж екосистеми.

За умови константності в зоні оптимуму показників інших факторів, існує залежність між розмірами часточок мінеральної основи ґрунту і потенціалом спонтанного тераформінгу. Для земної біоти оптимальними показниками є часточки розміром від 0,005 мм до 0,05 мм, що відповідають еоловому лесу.

Список використаної літератури

- Дідух Я.П., Плюта П.Г. Фітоіндикація екологічних факторів Київ : Наукова думка, 1994. 280 с.
- Дубина Д.В. та ін. Продромус рослинності України. Київ : Наукова думка, 2019. 784 с.
- Хом'як І.В. Глобальні екологічні проблеми з точки зору астроекології. *Екологічні науки*. 2021. № 6 (39). С. 154–157.
- Carte M.E., Chen F., Clark B.C., Schneegurt M.A. Succession of the bacterial community from a spacecraft assembly clean room when enriched in brines relevant to Mars. *International Journal of Astrobiology*. 2024. № 23. <https://doi.org/10.1017/S1473550423000277>.
- Chon-Torres O.A. Astrobioethics. *International Journal of Astrobiology*. 2018. № 17. P. 51–56.
- Craven E., Winters M., Smith A.L., Lalime E., Mancinelli R., Shire, B., Ruvkun G. Biological safety in the context of backward planetary protection and Mars Sample Return: conclusions from the Sterilization Working Group. *International Journal of Astrobiology*. 2021. № 20 (1). P. 1–28.
- Harbar O., Khomiak I., Kotsiuba I., Demchuk N., Onyshchuk I. Anthropogenic and natural dynamics of landscape ecosystems of the Slovechansko-Ovruchsky ridge (Ukraine). *Soc. ekol.* 2021. № 3. P. 347–367.
- Harbar O., Lavryk O., Khomiak I., Vlasenko R., Andriychuk T., Kostiuk V. Spatiotemporal analysis of the changes of the main habitats of the Kozachelaherska arena (Nyzhniodniprovsky sands, Kherson region, Ukraine) in the period of 1990–2020. *Auc Geographica*, 2023. № 53. P. 64–73.
- Khomiak I., Harbar O., Demchuk N., Kotsiuba I., Onyshchuk I. Above-ground phytomas dynamics in autogenic succession of an ecosystem. *Forestry ideas*. 2019. № 1. P. 136–146.
- Khomiak I., Vasylenko O. Using the rules of natural recovery of ecosystems for the process of revegetation and terraforming. *Ekologia i racjonalne zarzadzanie przyrodą: edukacja, nauka i praktyka [Zasób elektroniczny]: materiały z międzynarodowej konferencji naukowo-praktycznej, (Łomża – Żytomierz, 15.11.2023 r. / Pod redakcją naukową Zoia Sharlovych, Janusz Lisowski, Ruslana Romaniuk. Część 1. Łomża: MANS w Łomży, 2023. P. 199–203.*
- Khomiak O., Benndorf J. Image segmentation methods for quick characterization of ore chip using RGB images. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 942. № 1. 012033 p.
- Khomiak O., Benndorf J., Verbeek G. Sub-Surface Soil Characterization Using Image Analysis: Material Recognition Using the Grey Level Co-Occurrence Matrix Applied to a Video-CPT-Cone. *Mining*. 2024. № 4 (1). P. 91–105.
- Odum Eugene P. *Fundamentals of Ecology*. Philadelphia: H B. Holt.Saunders, 1971. 574 p.
- Onyshchuk I.P., Khomiak I.V. The use of the complex action of environmental factors in the process of space colonization. *Ecological sciences*. 2022. № 3 (42). P. 107–110.
- Taylor A.R., Newman C.J. Law, ethics, and space: Space exploration and environmental values. *Etyka*. 2018. № 56. P. 51–74.
- Totsline N., Kniel K.E., Bais H.P. Microgravity and evasion of plant innate immunity by human bacterial pathogens. *npj Microgravity*. 2023. № 9. 71 p. <https://doi.org/10.1038/s41526-023-00323-x>.

Totsline N., Kniel K.E., Sabagyanam C. et al. Simulated microgravity facilitates stomatal ingression by Salmonella in lettuce and suppresses a biocontrol agent. *Sci Rep*. 2024. № 14. 898 p. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51573-y>.

Westhoff V., Maarel E. The Braun-Blanquet approach. Handbook of Vegetation Science / Ed. By R.H. Whittaker. Hague : Dordrecht, 1973. P. 619–726.

Zaccaria Tommaso et al. Survival of Environment-Derived Opportunistic Bacterial Pathogens to Martian Conditions: Is There a Concern for Human Missions to Mars? *Astrobiology*. 2024. <https://doi.org/10.1089/ast.2023.0057>.

References (translated and transliterated)

Didukh, Ya.P., & Pliuta, P.H. (1994). Fitoindykatsiia ekolohichnykh faktoriv [Phytoindication of environmental factors]. Kyiv : Naukova dumka [in Ukrainian].

Dubyna, D.V., et al. (2019). Prodrumus roslynnosti Ukrainy [Prodrumus vegetation of Ukraine]. Kyiv : Naukova dumka [in Ukrainian].

Khomiak, I.V. (2021). Hlobalni ekolohichni problemy z tochky zoru astroekolohii [Global environmental problems from the point of view of astroecology]. *Ekolohichni nauky [Ecological Sciences]*, 6 (39), 154–157 [in Ukrainian].

Carte, M.E., Chen, F., Clark, B.C., & Schneegurt, M.A. (2024). Succession of the bacterial community from a spacecraft assembly clean room when enriched in brines relevant to Mars. *International Journal of Astrobiology*, 23. <https://doi.org/10.1017/S1473550423000277> [in English].

Chon-Torres, O.A. (2018). Astrobioethics. *Int. J. Astrobiology*, 17, 51–56 [in English].

Craven, E., Winters, M., Smith, A.L., Lalime, E., Mancinelli, R., Shirey, B., & Ruvkun, G. (2021). Biological safety in the context of backward planetary protection and Mars Sample Return: conclusions from the Sterilization Working Group. *International Journal of Astrobiology*, 20 (1), 1–28 [in English].

Harbar, O., Khomiak, I., Kotsiuba, I., Demchuk, N., & Onyshchuk, I. (2021). Anthropogenic and natural dynamics of landscape ecosystems of the Slovechansko-Ovruchsky ridge (Ukraine). *Soc. Ecol*, 3, 347–367 [in English].

Harbar, O., Lavryk, O., Khomiak, I., Vlasenko, R., Andriychuk, T., & Kostyuk, V. (2023). Spatiotemporal analysis of the changes of the main habitats of the Kozachelaherska arena (Nyzhniodniprovsky sands, Kherson region, Ukraine) in the period of 1990–2020. *Auc Geographica*, 53, 64–73 [in English].

Khomiak, I., Harbar, O., Demchuk, N., Kotsiuba, I., & Onyshchuk, I. (2019). Above-ground phytomas dynamics in autogenic succession of an ecosystem. *Forestry ideas*, 1, 136–146 [in English].

Khomiak, I., & Vasylenko, O. (2023). Using the rules of natural recovery of ecosystems for the process of revegetation and terraforming. *Ekologia i racjonalne zarzadzanie przyrodą: edukacja, nauka i praktyka [Zasób elektroniczny]: materiały z międzynarodowej konferencji naukowo-praktycznej, Łomża – Żytomierz, 15.11.2023 r. / Pod redakcją naukową Zoia Sharlovych, Janusz Lisowski, Ruslana Romaniuk. Część 1. Łomża: MANS w Łomży, 199–203* [in English].

Khomiak, O., & Benndorf, J. (2021). Image segmentation methods for quick characterization of ore chip using RGB images. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 942 (1), 012033 [in English].

Khomiak, O., Benndorf, J., & Verbeek, G. (2024). Sub-Surface Soil Characterization Using Image Analysis: Material Recognition Using the Grey Level Co-Occurrence Matrix Applied to a Video-CPT-Cone. *Mining*, 4 (1), 91–105 [in English].

Odum Eugene, P. (1971). *Fundamentals of Ecology*. H B.Holt.Saunders [in English].

Onyshchuk, I.P., & Khomiak, I.V. (2022). The use of the complex action of environmental factors in the process of space colonization. *Ecological sciences*, 3 (42), 107–110 [in English].

Taylor, A.R., & Newman, C.J. (2018). Law, ethics, and space: Space exploration and environmental values. *Etyka*, 56, 51–74 [in English].

Totsline, N., Kniel, K.E., & Bais, H.P. (2023). Microgravity and evasion of plant innate immunity by human bacterial pathogens. *npj Microgravit*, 9, 71. <https://doi.org/10.1038/s41526-023-00323-x> [in English].

Totsline, N., Kniel, K.E., & Sabagyanam, C. et al. (2024). Simulated microgravity facilitates stomatal ingression by Salmonella in lettuce and suppresses a biocontrol agent. *Sci Rep*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51573-y> [in English].

Westhoff, V., & Maarel, E. (1973). The Braun-Blanquet approach. Handbook of Vegetation Science / Ed. By R.H. Whittaker. Hague : Dordrecht [in English].

Zaccaria Tommaso et al., (2024). Survival of Environment-Derived Opportunistic Bacterial Pathogens to Martian Conditions: Is There a Concern for Human Missions to Mars? *Astrobiology*. <https://doi.org/10.1089/ast.2023.0057> [in English].

Отримано: 30.04.2024

Прийнято: 10.05.2024

ЗМІСТ

БІОЛОГІЯ

N. O. Khromykh, T. V. Sklyar, O. V. Liashenko Antimicrobial potential of bark extracts of the genus <i>Sorbus</i> plants.....	7
Є. В. Асмаковський, Ю. О. Карпенко Соснові ліси нижньої частини басейну річки Снов як рефугіуми для бореальних видів судинних рослин на південній межі Чернігівського Полісся.....	14
Л. В. Воробйова Екологічні чинники в формуванні кількісних характеристик молюсків тимчасового компоненту мейобентосу північно-західної частини Чорного моря.....	25
Л. П. Горальський, І. М. Сокульський, Н. А. Колеснік, Б. В. Гутий, Р. К. Романюк, О. В. Павлюченко, С. Ю. Шевчук, Ю. В. Максименко Анатомо-гістологічна будова та особливості морфометрії мозочка свійських птахів.....	35
Ю. В. Іконнікова, А. П. Стадниченко Еколого-фізіологічні особливості поширення прісноводного м'якуна <i>Planorbarius</i> (Superspecies) <i>Cornelius</i> Sensu Lato (Gastropoda, Pulmonata) у гідромережі України.....	50
С. О. Потоцька Інвентаризація та оцінка екосистемних послуг багатовікових дерев міста Чернігова з використанням інструменту i-Tree Eco	58
С. А. Сідоровський Фауна Cladocera (Diplostraca) Харківської області, Україна.....	68
Р. А. Циганник, С. О. Коваленко Вплив градуїрованої пасивної ортопроби на гемодинаміку здорових чоловіків з різним рівнем вегетативного тонусу.....	75
Ю. С. Шелюк, О. П. Житова, М. М. Микула, І. І. Оводюк Фітопланктон ставків рекреаційного призначення Житомирського району.....	83

ГЕОГРАФІЯ

А. В. Зигар Дослідження градієнта температур води між б'єфами природно-технічної геосистеми Дністровської ГАЕС.....	92
Ж. М. Матвіїшина, О. Г. Пархоменко Трансформація процесів ґрунтоутворення у межах давнього поселення неподалік с. Сколобів на Житомирщині: просторово-часовий аналіз	101
С. М. Остапчук, О. П. Остапчук, Н. В. Кушнірук Картографічне моделювання вмісту калію у ґрунтах Здолбунівщини Рівненської області.....	111
В. Ю. Стельмах Аналіз гідрографічної мережі та сучасного гідрологічного режиму річки Стир (2020–2022 рр.).....	119

ХІМІЯ

О. М. Камінський, Р. О. Денисюк, М. В. Чайка, С. В. Писаренко, О. С. Євдоченко, Д. Ю. Панасюк Кінетика вирощування кілець Лізенганга в еластичних желатинових гелях.....	131
В. А. Литвин, Р. А. Галаган, Е. О. Романенко, Ю. А. Шафорост, О. А. Лут Одержання наночастинок золота з використанням ваніліну.....	140

Р. П. Мигущенко, М. М. Волобуєв, І. В. Асєєва, О. Ю. Кропачек, В. М. Балєв	
Вплив температури на константу дисоціації оцтової кислоти.....	148
А. В. Редько, Ю. В. Тамаркіна, В. О. Кучеренко	
Нанопористі матеріали з довгополюменевого вугілля для очищення води від барвника метиленового блакитного.....	155
О. П. Шевченко, О. А. Лут, Ю. А. Шафорост, О. С. Погребняк	
Вольтамперометричні дослідження процесу окиснення піридоксину гідрохлориду на масивах гострійних структур, модифікованих платиною.....	168

АГРОНОМІЯ

Л. В. Гаврилюк, І. В. Безноско, Т. М. Горган, А. М. Ліщук	
Формування популяцій фітопатогенів у листковому мікобіомі рослин ячменю ярого.....	179
Р. О. Кузьменко, Л. А. Яковець, О. М. Тихонова, Р. М. Бордун, Л. В. Крючко	
Вплив регулятора росту біологічного походження <i>Leanum</i> на продуктивність сортів гречки різного морфотипу.....	191
Т. О. Падалко	
Залежність польової схожості та виживання рослин нагідок лікарських (<i>Calendula officinalis L.</i>) від чинників вегетації та агротехнічних прийомів в умовах Правобережного Лісостепу України.....	199

ЕКОЛОГІЯ

A. Borusiewicz, K. Cieslinski, J. Lisowski, H. Porwisiak	
Comparison of biometric characteristics of oxytree planting in traffic routes in the city of Lomza in 2019–2020.....	207
O. V. Yermishev	
Ecological and comparative analysis of the influence of the weather factor under the simultaneous action of heliomagnetic storms (HMS) on the vegetative balance of girls of different ages.....	217
N. E. Semenyuk, V. I. Shcherbak, Yu. S. Shelyuk	
Patterns of contour algal communities' functioning in aquatic ecosystems of the Dnieper basin (Ukraine) under different alternative stable regimes.....	231
О. К. Виноградов, Ю. І. Богатова, І. О. Синьогуб	
Абіотичні особливості екосистем мисів північно-західної частини Чорного моря.....	245
О. М. Крайнюков, І. А. Кривицька, О. Є. Найдьонова	
Алгоритм оцінюванню базового набору таксонів задля визначення їх ефективності	252
Є. Є. Мельник, С. Г. Сидоренко, О. Б. Бондар, Л. О. Бицюра, І. М. Коваль	
Стан молодняків сосни природного походження після низової пожежі.....	260
А. В. Пасенко, І. О. Солошич	
Інновації екологічного управління автотранспортною системою урбоекосистем з метою зниження техногенного навантаження на атмосферу.....	269
В. О. Фесюк, І. М. Нетробчук, С. В. Полянський, Д. Я. Довган	
Особливості сучасного стану евтрофікації Шацьких озер	279
І. В. Хом'як, О. І. Хом'як	
Потенціал спонтанного тераформінгу ландшафтів суходолу з позицій сучасної теорії динаміки екосистем	289

НОТАТКИ