

2023

ISSN 2786-6335 print
ISSN 2786-6343 online

Український журнал природничих наук

Ukrainian Journal of Natural Sciences

Український журнал природничих наук



Випуск 5

Випуск 5

2023

Міністерство освіти і науки України
Житомирський державний університет імені Івана Франка

Український журнал природничих наук

№ 5

Науковий журнал,
заснований у 2022 році



Видавничий дім
«Гельветика»
2023

Видається за рішенням вченої ради Житомирського державного університету імені Івана Франка
(протокол № 19 від 27.10.2023 року).

Головний редактор

Овчаренко Микола – хабілітований 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 зрошувального землеробства НААН України (Херсон, Україна)

Біляєва Ірина – доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу маркетингу, трансферу інновацій та економічних досліджень Інституту зрошувального 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 (м. 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 зрошувального землеробства Інституту зрошувального 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 зрошувального 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: 2023. № 5. 154 с.

Свідоцтво про державну реєстрацію: Серія КВ № 25169-15109Р від 09.06.2022

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: journals.univ.zhitomir.ua/index.php/ujns
Макетування: Молодецька О. І.

В усіх статтях збережено орфографію та пунктуацію авторів.

Підписано до друку 27.10.2023 р. Формат 60x90/8. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 19,96. Обл.-вид. арк 19,25. Тираж 300. Замовлення 1223/790

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, 2023

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

Ukrainian Journal of Natural Sciences

№ 5

Scientific journal,
founded in 2022



Publishing House
"Helvetica"
2023

*Approved for publication by the Academic Council of Zhytomyr Ivan Franko State University
(protocol № 19 dated from 27.10.2023).*

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: 2023. № 5. 154 p.

Certificate of state registration: Series KB № 25169-15109P dated 09.06.2022

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: journals.univ.zhitomir.ua/index.php/ujns
Modelling: Molodetska O. I.

Authors' spelling and punctuation are preserved in the articles.

Signed for printing 27.10.2023 p. Size 60x90/8. Offset Paper. Font Times New Roman
Risograph printing. Conventional printed sheets 19.96. Printed sheets 19.25. Number of copies 300. Order 1223/790

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, 2023



БІОЛОГІЯ

УДК 594.381.5:574.64

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.1>

ВПЛИВ ІОНІВ КАДМІЮ НА ВМІСТ ОКРЕМИХ ГРУП ЛІПІДІВ В ТКАНИНАХ І ОРГАНАХ *LYMNAEA STAGNALIS*

Г. Є. Киричук¹, А. В. Музика², М. М. Микула³, О. А. Веселовська⁴,
Ю. С. Довжинець⁵

*Розглянуто особливості вмісту загальних ліпідів та їх окремих груп (триацилгліцероли (ТАГ), диацилгліцероли (ДАГ), неетерифіковані жирні кислоти (НЕЖК) та фосфоліпіди (ФЛ)) у гемолімфі, гепатопанкреасі, мантії та нозі *Lymnaea stagnalis* за дії іонів кадмію в концентрації, що відповідає 5 ГДК_{рибозеп.} З'ясовано, що вміст зазначених сполук в організмі *L. stagnalis* є різноплановим, органоспецифічним та значною мірою залежить від тривалості дії токсиканту (2, 7 діб).*

¹ доктор біологічних наук, професор,
професор кафедри ботаніки,
біоресурсів та збереження біорізноманіття
(Житомирський державний університету імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: kyrychuk@zu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-1059-2834

² кандидат біологічних наук, доцент кафедри ботаніки,
біоресурсів та збереження біорізноманіття
(Житомирський державний університету імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: lidiya.muzyka@ukr.net
ORCID: 0000-0001-7752-7853

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 вищої освіти другого
(магістерського) рівня вищої освіти
спеціальності 091 Біологія
(Житомирський державний університету імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: oksanaveselovska81@gmail.com
ORCID: 0009-0006-7526-6550

⁵ здобувач вищої освіти другого
(магістерського) рівня вищої освіти
спеціальності 091 Біологія
(Житомирський державний університету імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: chix1410694@gmail.com
ORCID: 0009-0001-4043-7069

Встановлено, що іони Cd^{2+} незалежно від тривалості експозиції обумовлюють зменшення вмісту ТАГ у гепатопанкреасі, мантії та нозі *L. stagnalis* на 16,16–38,76% ($p \leq 0,05-0,01$), що, імовірно, свідчить про активацію ліпаз та посилення процесів ліполізу задля компенсації високих енергетичних витрат, пов'язаних із адаптацією організму молюсків до дії досліджуваного токсиканта. Поряд із зниженням показників ТАГ у гепатопанкреасі *L. stagnalis* зафіксовано збільшення вмісту ДАГ та НЕЖК на 10,43–34,59% ($p \leq 0,05-0,01$) за короткострокової дії Cd^{2+} (2 доби), а при пролонгуванні до 7 діб відмічено суттєве накопичення ДАГ в органі. Щодо показників НЕЖК, то статистично достовірних відмінностей з контрольною групою тварин для гепатопанкреасу не встановлено. У мантії, нозі та гемолімфі вміст окремих ліпідних груп специфічний та обумовлений часом перебування *L. stagnalis* у токсичному середовищі. Отримані нами свідчать з одного боку про активацію захисних механізмів у досліджуваних тварин, а з іншого – про фізіологічні та біохімічні зрушення в організмі.

Отже, вміст ліпідів досліджених груп відображає адаптивну реакцію організму *L. stagnalis* на зміну чинників навколишнього середовища.

Ключові слова: триацилгліцероли, діацилгліцероли, неестерифіковані жирні кислоти, фосфоліпіди, іони важких металів, прісноводні молюски, окислювальний стрес.

THE INFLUENCE OF CADMIUM IONS ON CERTAIN LIPID GROUPS IN LYMNAEA STAGNALIS TISSUES AND ORGANS

G. Ye. Kyrychuk, L. V. Muzyka, M. M. Mykula, Y. S. Dovzhynets, O. A. Veselovska

The quantity of total lipids and their separate groups (triacylglycerols (TAG), diacylglycerols (DAG), non-esterified fatty acids (NEFA) and phospholipids (PL)) in the hemolymph, hepatopancreas, mantle and leg of *Lymnaea stagnalis* was studied under the influence of cadmium ions at a concentration of 5 maximum permissible concentrations for fishing ponds. It was found that the quantity of these compounds in the body of *L. stagnalis* is diverse, organ-specific and largely depends on the duration of the influence of the toxicant (2, 7 days).

It was determined that Cd^{2+} ions, regardless of the duration of exposure, cause a decrease of triacylglycerols in the hepatopancreas, mantle and leg of *L. stagnalis* by 16.16–38.76% ($p \leq 0.05-0.01$), which probably indicates the activation of lipases and strengthening of lipolysis processes to compensate the high energy loss associated with adaptation of the mollusk body to the action of the toxicant. Along with a decrease in triacylglycerols in the hepatopancreas of *L. stagnalis*, an increase in the content of diacylglycerols and non-esterified fatty acids by 10.43–34.59% ($p \leq 0.05-0.01$) was recorded under the short-term effect of Cd^{2+} (2 days), and with prolongation up to 7 days significant accumulation of diacylglycerols in the body was noted. As for the indicators of NEFA, no statistically significant differences with the control group of animals for the hepatopancreas were established. In the mantle, leg, and hemolymph, the content of individual lipid groups is specific and determined by the time *L. stagnalis* is in a toxic environment. The results obtained by us indicate, on the one hand, the activation of protective mechanisms in the studied animals, and on the other hand, physiological and biochemical changes in the body.

Therefore, the lipid content of the studied groups reflects the adaptive response of the *L. stagnalis* organism to changes in environmental factors.

Key words: triacylglycerols, diacylglycerols, non-esterified fatty acids, phospholipids, heavy metal ions, freshwater mollusks, oxidative stress.

Вступ

Іони кадмію є одним із найнебезпечніших забруднювачів водного середовища, який надходить у природні води, насамперед, у результаті вилуговування з ґрунтів та гірських порід, зі стоками гірничодобувної, збагачувальної і електролізної промисловості, а також при інтенсифікації сільськогосподарського виробництва (Дудник і Євтушенко, 2013; Lee et al., 2023). Іони кадмію є ксенобіотиком, що не характеризу-

ється вираженою біологічною активністю та навіть у залишкових концентраціях виявляє пряму токсичну дію на організми гідробіонтів, викликаючи незворотні ушкодження їх фізіологічних систем, порушуючи цілісність біологічних мембран і маючи високу спорідненість із сульфгідрильними, карбоксильними та фосфатними групами, інгібує активність ферментів та порушує метаболічні процеси (Liu et al., 2022; Lee et al., 2023). Окрім цього, іони кадмію здатні індукувати

утворення активних форм кисню (АФК) на клітинному рівні та знижувати антиоксидантну активність клітин, що призводить до розвитку окислювального стресу, утворення вільних радикалів, прискорення процесів перекисного окиснення, зміни мітохондріального метаболізму та гомеостазу деяких основних іонів (Ren et al., 2013; Choong et al., 2014; Liu et al., 2022; Lee et al., 2023). Це спричинює порушення фізіологічних та біохімічних процесів, розвитку патологічних змін та загибель гідробіонтів, які за масового вимирання можуть виступати джерелами вторинного забруднення водних екосистем іонами важких металів (Okocha & Adedeji, 2011; Дудник і Євтушенко, 2013; Крайнюков і Тімченко, 2016).

Зважаючи на те, що однією з перших структур клітини, яка відчуває вплив стресових чинників є клітинна мембрана, очевидним наслідком дії токсичних речовин є порушення ліпідного бішару, що в свою чергу веде за собою зміни вмісту біохімічних показників клітини, зокрема ліпідів та їх складових компонентів (Rajakumar et al., 2016a). У зв'язку з цим, вивчення динаміки ліпідного статусу прісноводних молюсків є актуальним, адже може відображати вплив екологічних чинників навколишнього середовища на початковому біохімічному етапі, задовго до появи фізіологічних змін в живому організмі та трансформації на вищих рівнях біологічної організації.

На сьогодні вивченню впливу іонів важких металів на вміст ліпідів в організмі морських молюсків, риб та ссавців присвячено низку наукових праць, водночас як для прісноводної малакофауни обговорюваний показник вивчено фрагментарно. Прісноводні молюски ж здатні біоакумулювати, концентрувати та передавати ланцюгами живлення забруднюючі речовини, зокрема й іони важких металів (Ситник та ін., 2012), у зв'язку з чим є індикаторами забруднення природних вод та слугують гарною моделлю у дослідженнях механізмів відповіді на зміну екологічних чинників водного середовища.

Матеріал та методи

Матеріалом для дослідження слугували молюски виду *Lymnaea stagnalis* (Linnaeus, 1758), відібрані у жовтні 2022 в р. Тетерів (м. Коростишів, Житомирський район, Житомирська область). Для аклімації до лабораторних умов молюсків по 10 екз. утримували протягом 14 діб в акварію-

мах з відстояною протягом доби аерованою водопровідною водою ($t = 18-20$ °C; $pH = 7,3-7,7$; вміст кисню = $8,5-8,9$ мг/дм³). Як токсикант використано $CdCl_2 \cdot 2,5H_2O$ в концентрації $0,0025$ мг/дм³, яка відповідає 5 ГДК_{рибобосп.} Розрахунок концентрації проведено на катіон. Експозиція – 2 та 7 діб. Для контрольної групи *L. stagnalis* інкубаційним середовищем слугувала водопровідна дехлорована вода без додавання токсиканту. Для експерименту відібрано особин однієї і тієї ж розмірної групи ($m = 4,64 \pm 1,32$ г; $l = 43,2 \pm 2,67$ мм; $h = 25,12 \pm 2,81$ мм). Морфометричні параметри вимірювали штангенциркулем, а масу визначали електронними вагами (Axis A500) з точністю до $0,01$ г. Для біохімічного дослідження відібрано гепатопанкреас, мантію та ногу, які отримували, анатомуючи тварин. Гемолімфу отримували методом прямого знекровлення (Киричук і Стадниченко, 2003). Трематодну інвазію виявляли на тимчасових гістологічних препаратах, виготовлених із тканин гепатопанкреасу *L. stagnalis*. Для забезпечення чистоти токсикологічного дослідження для експерименту відібрано лише неінвазовані екземпляри.

Загальні ліпіди з тканин екстрагували сумішшю хлороформ-метанол (співвідношення 2:1) за методом Фолча (Folch et al., 1957). Кількість загальних ліпідів визначали ваговим методом. Розділення ліпідів на окремі групи здійснювали методом висхідної одномірної тонкошарової хроматографії на пластинках «Sorbfil» (ПТСХ-АФ-А) в системі розчинників гексан-диетилловий ефір-льодяна оцтова кислота (співвідношення 70:30:1). Одержані хроматограми піддавали дії проявника, яким виступали пари кристалічного йоду. Кількість окремих груп ліпідів визначали за методиками (Kates, 1972). Усі використані реактиви мали кваліфікацію ч.д.а.

Статистичну обробку результатів дослідження проводили загальноприйнятими статистичними методами із застосуванням t-критерію Ст'юдента. Розбіжності вважали статистично вірогідними при $p \leq 0,05-0,001$.

У процесі виконання експерименту норми біоетики порушені не були.

Результати та обговорення

Ліпіди є одним із найважливіших компонентів живих організмів, що слугують біологічними ефекторами, регуляторами та медіаторами багатьох фізіолого-біохімічних процесів, є джерелом метаболічної енергії та пластичним матеріалом для формування

клітинних мембран (Lehninger et al., 2008). Відомо, що модифікація вмісту ліпідів та співвідношення окремих ліпідних груп у відповідь на токсичну дію іонів ВМ є компенсаторною реакцією гідробіонтів та відіграє важливу роль в розвитку їх фізіолого-біохімічної адаптації, що дозволяє використовувати ці речовини як біохімічні індикатори фізіологічного стану обговорюваних тварин і середовища їх існування (Vance D. & Vance J., 2002; Hochachka & Somero, 2002; Ekin et al., 2011).

У зв'язку із цим, очікуваним є суттєвий вплив іонів кадмію на динаміку вмісту загальних ліпідів та їх окремих груп в організмі *L. stagnalis*, модуляція якого, як з'ясовано, є різноплановою, органоспецифічною та в значній мірі залежить від концентрації токсиканту та тривалості його дії.

У результаті проведених нами досліджень з'ясовано, що в організмі контрольної групи молюсків (експозиція 2 доби) вміст ліпідів складає 10,33–25,53 мг/г сирової маси тканини (органу). При цьому, найвищі показники зафіксовано у мантиї молюсків, а найнижчі – у гемолімфі. Розподіл загальних ліпідів на окремі групи показав відмінності у їх накопиченні дослідженими нами тканинами й органами. Метаболічні ряди в порядку збільшення кількісних значень мають наступний вигляд:

Триацилгліцероли: гемолімфа → гепатопанкреас → нога → мантия.

Диацілгліцероли: гемолімфа → гепатопанкреас → нога.

Неетерифіковані жирні кислоти: гепатопанкреас → нога → мантия.

Фосфоліпіди: гемолімфа → гепатопанкреас → нога → мантия.

Така динаміка, очевидно, визначається фізіологічним станом тварини, особливостями метаболізму її організму та метаболічною роллю окремих органів та тканин (Ekin et al., 2011).

З'ясовано, що дія іонів кадмію в концентрації 0,0025 мг/дм³ (5 ГДК) протягом 2 діб обумовлює збільшення вмісту загальних ліпідів у гепатопанкреасі досліджуваних молюсків на 91,38% ($p < 0,01$) відносно контролю, що пов'язано із метаболічною роллю органу, який виконує функцію запасання та перерозподілу ліпідів в організмі гідробіонтів. Водночас, у гемолімфі *L. stagnalis* зафіксовано зниження обговорюваних показників на 12,90%, а у нозі та мантиї значення контрольної та дослідної груп виявились величинами одного

порядку. Імовірно, така динаміка свідчить про перерозподіл ліпідів між органами *L. stagnalis* за умови токсичного впливу.

Зважаючи на отриману динаміку, доцільним виявилось вивчити вплив іонів Cd²⁺ у досліджуваній концентрації на співвідношення окремих груп неполярних ліпідів (ТАГ, ДАГ, НЕЖК) та фосфоліпідів (ФЛ) в тканинах і органах *L. stagnalis*.

Встановлено, що дія токсиканту протягом 2 діб обумовлює зменшення вмісту ТАГ у гепатопанкреасі, мантиї та нозі *L. stagnalis* на 16,16 – 27,99% ($p \leq 0,05-0,01$), що, імовірно, відображає захисну реакцію досліджуваних молюсків, пов'язану із активацією ліпаз та фосфоліпаз і посиленням процесів ліполізу задля заповнення дефіциту енергетичних ресурсів, викликаного дією стресового чинника. Це підтверджується збільшенням показників ДАГ та НЕЖК в гепатопанкреасі на 10,43–34,59% ($p \leq 0,05-0,01$) (рис. 1).

Окрім цього, слід відмітити суттєве накопичення в гемолімфі та мантиї досліджуваних тварин ДАГ, яких не було виявлено у молюсків контрольної групи. Щодо НЕЖК, то за дії іонів кадмію їх вміст зменшувався на 26,62–47,53% ($p \leq 0,05-0,001$) у нозі та мантиї, а у гемолімфі за таких умов експерименту жирних кислот не було виявлено.

Підтвердженням активації ліполітичних процесів в організмі *L. stagnalis* за дії іонів кадмію є зниження вмісту фосфоліпідів в гепатопанкреасі, мантиї та нозі на 14,99–43,25 % ($p \leq 0,05-0,001$). Крім того, така динаміка може пояснюватись особливостями дії Cd²⁺, які індукують перекисне окислення ФЛ мембран та обумовлюють їх деградацію, що призводить до зменшення кількісних показників ліпідної групи не лише в гепатопанкреасі, але і у інших досліджених нами органах.

Аналіз тканинно-органного розподілу досліджених ліпідних груп за дії Cd²⁺ дозволив вибудувати такі метаболічні ряди (у порядку зменшення кількісних показників):

Триацилгліцероли: мантия → гепатопанкреас → нога → гемолімфа.

Диацілгліцероли: мантия → гепатопанкреас → гемолімфа → нога.

Неетерифіковані жирні кислоти: мантия → гепатопанкреас → нога.

Фосфоліпіди: мантия → гепатопанкреас → нога → гемолімфа.

При збільшенні часу контакту тварин із токсикантом до 7 діб зафіксовано зни-

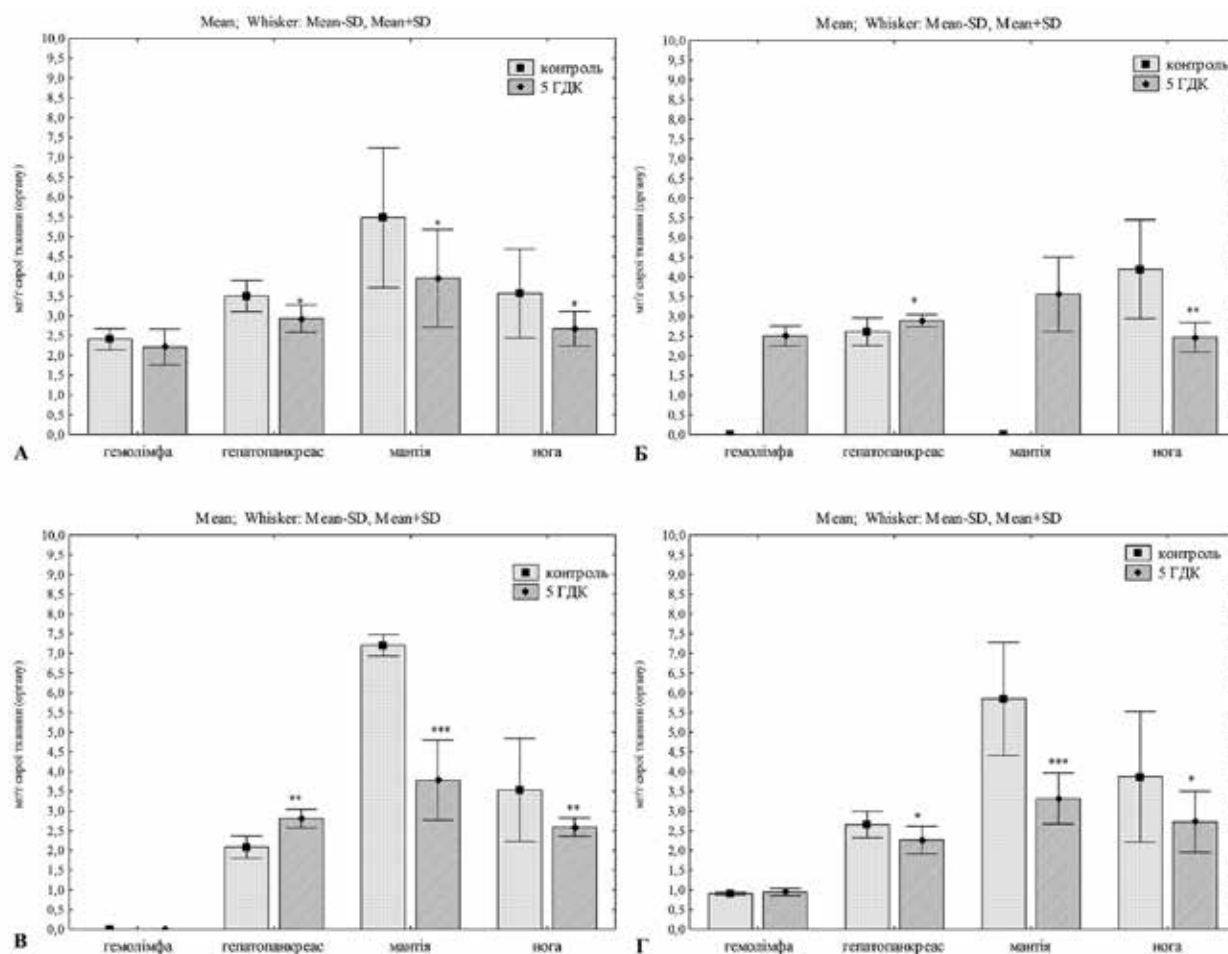


Рис. 1. Вплив іонів Cd²⁺, концентрацією, що відповідає 5 ГДК (експозиція – 2 доби) на окремих груп ліпідів у тканинах і органах *L. stagnalis*: А – ТАГ, Б – ДАГ, В – НЕЖК, Г – ФЛ; * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$

ження показників вмісту триацилгліцеролів у гепатопанкреасі, мантії та нозі *L. stagnalis* на 35,47–38,76% ($p < 0,05$), що, імовірно, пов'язано із компенсацією високих енергетичних витрат, викликаних адаптацією до дії іонів кадмію, адже відомо, що запасні ТАГ здатні швидко мобілізуватися в організмі та забезпечувати в 2,5 рази більше енергії на одиницю маси, ніж вуглеводи (Ekin et al., 2011). Окрім цього, така динаміка може свідчити про використання структурних елементів триацилгліцеролів для синтезу інших біологічно активних речовин у клітині, енергетичних субстратів вуглеводної та білкової природи, а також про метаболічні перебудови між резервними та структурними ліпідними фракціями за умови токсичного впливу (Chan et al., 2018). Водночас, для гемолімфи за обговорюваним показником не встановлено статистично достовірних відмінностей від контролю (рис. 2).

З'ясовано, що, дія Cd²⁺ (7 діб) викликає накопичення ДАГ у гепатопанкреасі та

гемолімфі досліджуваних молюсків (у тварин контрольної групи ліпідної фракції не виявлено) та зниження показників на 42,73–42,85% ($p \leq 0,05-0,01$) у їх мантії та нозі.

Динаміка вмісту НЕЖК органоспецифічна: показники зростали на 30,40% у нозі, знижувались на 24,16% у мантії, а у гепатопанкреасі не встановлено статистично достовірних відмінностей від контролю

Вміст фосфоліпідів зменшувався на 37,92% ($p < 0,001$) у гепатопанкреасі, збільшувався (на 17,38–27,73%) у гемолімфі та мантії, а в нозі показники контрольної та дослідної групи знаходились в одному діапазоні значень. Імовірно, отримані нами результати, свідчать з одного боку про безпосередню дію токсиканту на метаболізм фосфоліпідів та втрату цілісності біологічної мембрани, а з іншого – про метаболічні перебудови в організмі досліджуваних молюсків, пов'язані із мобілізацією пулу відповідних фосфоліпідів з метою структурних перебудов ліпідного бішару (Ячна та ін., 2019).

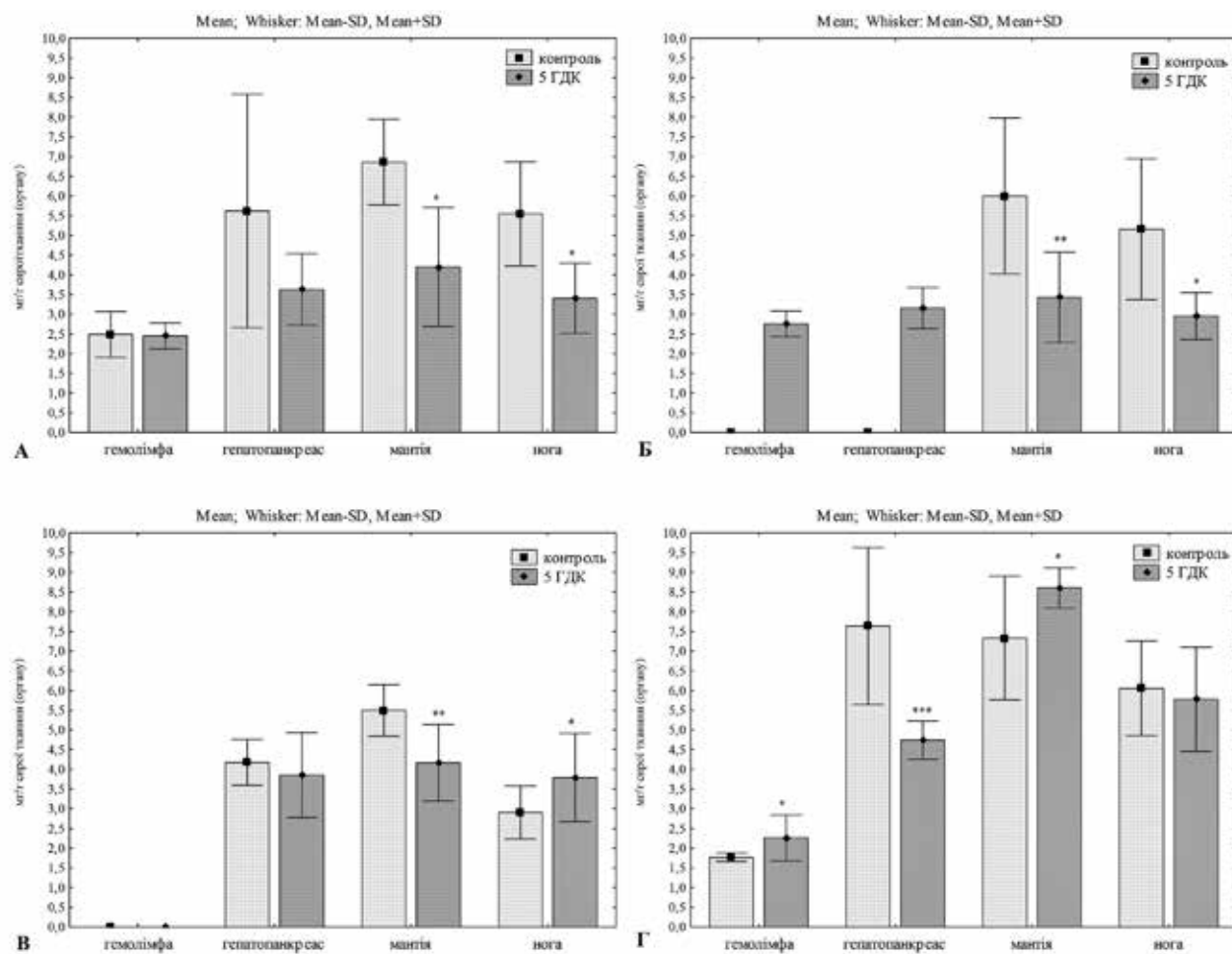


Рис. 2. Вплив іонів Cd²⁺, концентрацією, що відповідає 5 ГДК (експозиція – 7 діб) на окремих груп ліпідів у тканинах і органах *L. stagnalis*: А – ТАГ, Б – ДАГ, В – НЕЖК, Г – ФЛ; * – p < 0,05; ** – p < 0,01; *** – p < 0,001

Висновки

Отже, вміст і склад ліпідів є ключовим компонентом метаболічних реакцій *L. stagnalis*, що пов'язані із толерантністю та відображають компенсаторні реакції прісноводних молюсків на дію екологічних чинників водного середовища.

Нашими експериментами встановлено, що іони Cd²⁺ (5 ГДК) викликають суттєві якісні та кількісні зміни вмісту досліджуваних груп ліпідів в організмі *L. stagnalis*, що свідчить з одного боку про активацію

захисних механізмів досліджуваних тварин, а з іншого – про фізіологічні та біохімічні зрушення в організмі. Відмічено тканинну специфічність динаміки ліпідного профілю досліджуваних молюсків за дії токсиканту, обумовлену метаболічною функцією тканин (органів) та роллю окремих ліпідних груп у реалізації адаптивних реакцій на зміну чинників середовища. Описано метаболічні ряди для кожної з досліджуваних ліпідних груп за умови токсичного впливу.

Список використаної літератури

Дудник С.В., Євтушенко М.Ю. Водна токсикологія: основні теоретичні положення та їхнє практичне застосування : монографія, Київ : Вид-во Українського фітосоціологічного центру, 2013. 297 с.

Крайнюков О.М., Тімченко В.Д. Вплив хімічних речовин токсичної дії на представників біотичної складової водних екосистем. *Проблеми охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки*. 2016. 38. С. 111–120.

Ситник Ю.М., Арсан О.М., Киричук Г.Є., Ляшенко А.В., Вітовецька Т.В. Вміст важких металів в органах та тканинах молюсків деяких водойм міської зони Києва. *Наукові записки*

Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. 2012. (51). С. 230–236.

Киричук Г.Є., Стадниченко А.П. Фізико-хімічні особливості гемолімфи *Planorbarius purpura* та *P. corneus* (Mollusca: Gastropoda: Pulmonata: Bulinidae). *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2003. 32. С. 239–245.

Ячна М.Г., Мехед О.Б., Третяк О.П., Яковенко Б.В. Вміст фосфоліпідів у тканинах коропа лускатого (*Syrpinus carpio* L.) за дії натрій лаурилсульфатвмісного та безфосфатного синтетичних миючих засобів. *Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер. Біол.* 2019. № 2 (76). С. 48–52.

Chan C.Y., Wang W.X. A lipidomic approach to understand copper resilience in oyster *Crassostrea hongkongensis*. *Aquatic Toxicology*. 2018. 204. 160–170. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2018.09.011>.

Choong G., Liu Y., Templeton D.M. Interplay of calcium and cadmium in mediating cadmium toxicity. *Chemicobiological interactions*. 2014. 211. P. 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2014.01.007>.

Ekin I., Başhan M., Şeşen R. A comparison of the fatty acid composition of the phospholipid and neutral lipid of *Unio elongatulus* (Bourguignat, 1860) (Bivalvia: Unionidae) mussels from 4 different localities in southeastern Anatolia, Turkey. *Turkish Journal of Zoology*. 2011. 35 (6). P. 837–849. <https://doi.org/10.3906/zoo-1002-5>.

Folch J., Lees M., Sloane Stanley A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues. *J Biol Chem*. 1957. 226 (1). P. 497–509. [https://doi.org/10.1016/s0021-9258\(18\)64849-5](https://doi.org/10.1016/s0021-9258(18)64849-5).

Hochachka P.M., Somero G.N. *Biochemical Adaptation*. Oxford : Princeton University Press, 2002.

Kates M. Isolation, analysis and identification of lipids. *Techniques in Lipidology*. 1972. P. 268–618.

Lee J.W., Jo A.W., Choi C., Kim J.H. Review of cadmium toxicity effects on fish: oxidative stress and immune responses. *Environmental Research*. 2023. 236. 116600. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116600>.

Lehninger A.L., Nelson D.L., Cox M.M. *Lehninger principles of biochemistry*. Macmillan, 2005.

Liu Y., Chen Q., Li Y., Bi L., Jin L., Peng R. Toxic effects of cadmium on fish. *Toxics*. 2022. 10 (10). 622 p. <https://doi.org/10.3390/toxics10100622>.

Rajakumar S., Bhanupriya N., Ravi C., Nachiappan V. Endoplasmic reticulum stress and calcium imbalance are involved in cadmium-induced lipid aberrancy in *Saccharomyces cerevisiae*. *Cell Stress Chaperones*. 2016a. 21. P. 895–906. <https://doi.org/10.1007/s12192-016-0714-4>.

Ren J., Luo J., Ma H., Wang X., Ma L. Q. Bioavailability and oxidative stress of cadmium to *Corbicula fluminea*. *Environmental Science: Processes & Impacts*. 2013. 15 (4). P. 860–869. <https://doi.org/10.1039/c3em30288a>.

Vance D.E., Vance J.E. *Biochemistry of Lipids, Lipoproteins and Membranes*. 4th ed. Amsterdam : Elsevier, 2002.

References (translated & transliterated)

Dudnyk, S.V., & Jevtushenko, M.Ju. (2013). *Vodna toksykologhija: osnovni teoretychni polozhennja ta jikhnje praktychne zastosuvannja* [Aquatic toxicology: basic theoretical principles and their practical application]. Publishing House of the Ukrainian Phytosociological Center. Kyiv [in Ukrainian].

Kraynyukov, O.M., & Timchenko, V.D. (2016). *Vplyv khimichnykh rehovyn toksychnoyi diyi na predstavnykiv biotychnoyi skladovoyi ekosystemy* [Exposure to chemicals toxic effect on the representatives of the biotic component of aquatic ecosystems]. *Problemy okhorony navkolyshn'oho pryrodnoho seredovyscha ta ekolohichnoyi bezpeky* [Problems of environmental protection and ecological safety], 38, 111–120 [in Ukrainian].

Sytnyk, Ju.M., Arsan, O.M., Kyrychuk, G.Je., Ljashenko, A.V., & Vitovec'ka, T.V. (2012). *Vmist vazhkykh metaliv v orghanakh ta tkanynakh moljuskiv dejakykh vodojm misjkoji zony Kyjeva* [The content of heavy metals ions in organs and tissues of mollusks from some Kyiv city water reservoirs]. *Naukovi zapysky Ternopil'skogo nacional'nogho pedagoghichnogho universytetu imeni Volodymyra Ghnatjuka* [Scientific Issue Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University], 51, 230–236 [In Ukrainian].

Kyrychuk, H.Ye., & Stadnychenko A.P. (2003). *Fyzyko-khimichni osoblyvosti hemolimfy Planorbarius purpura ta P. corneus* (Mollusca: Gastropoda: Pulmonata: Bulinidae) [The physics-

chemical properties of the haemolymph of *Planorbarius purpura* and *P. corneus* (Mollusca: Gastropoda: Pulmonata: Bulinidae)]. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Seriya biologichna* [Visnyk of Lviv University. Biological series], 32, 239–245 [in Ukrainian].

Yachna, M.H., Mekhed, O.B., Tretiak, O.P., & Yakovenko, B.V. (2019). Vmist fosfolipidiv u tkanynakh koropa luckatoho (*Cyprinus carpio* L.) za dii natrii laurylsulfatvmisnoho ta bezfosfatnoho syntetychnykh myiuchykh zasobiv [Content of phospholipides in carp by surfactory active substances]. *Naukovi zapysky Ternopil'skogo nacional'nogho pedagoghichnogho universytetu imeni Volodymyra Ghnatjuka* [Scientific Issue Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University], 2 (76), 48–52 [in Ukrainian].

Chan, C.Y., & Wang, W.X. (2018). A lipidomic approach to understand copper resilience in oyster *Crassostrea hongkongensis*. *Aquatic Toxicology*, 204, 160–170. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2018.09.011> [in English].

Choong, G., Liu, Y., & Templeton, D.M. (2014). Interplay of calcium and cadmium in mediating cadmium toxicity. *Chemicobiological interactions*, 211, 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2014.01.007> [in English].

Ekin, I., Bařhan, M., & řeřen, R. (2011). A comparison of the fatty acid composition of the phospholipid and neutral lipid of *Unio elongatulus* (Bourguignat, 1860) (Bivalvia: Unionidae) mussels from 4 different localities in southeastern Anatolia, Turkey. *Turkish Journal of Zoology*, 35 (6), 837–849. <https://doi.org/10.3906/zoo-1002-5> [in English].

Folch, J., Lees, M., & Sloane Stanley (1957). A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues. *J Biol Chem*, 226 (1), 497–509. [https://doi.org/10.1016/s0021-9258\(18\)64849-5](https://doi.org/10.1016/s0021-9258(18)64849-5) [in English].

Hochachka, P.M., & Somero, G.N. (2002). *Biochemical Adaptation*. Oxford : Princeton University Press [in English].

Kates, M. (1972). Isolation, analysis and identification of lipids. *Techniques in Lipidology*, 268–618 [in English].

Lee, J.W., Jo, A.W., Choi, C., & Kim, J.H. (2023). Review of cadmium toxicity effects on fish: oxidative stress and immune responses. *Environmental Research*, 236, 116600. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116600> [in English].

Lehninger, A.L., Nelson, D.L., & Cox, M.M. (2005). *Lehninger principles of biochemistry*. Macmillan [in English].

Liu, Y., Chen, Q., Li, Y., Bi, L., Jin, L., & Peng, R. (2022). Toxic effects of cadmium on fish. *Toxics*, 10 (10), 622. <https://doi.org/10.3390/toxics10100622> [in English].

Rajakumar, S., Bhanupriya, N., Ravi, C., & Nachiappan, V. (2016a). Endoplasmic reticulum stress and calcium imbalance are involved in cadmium-induced lipid aberrancy in *Saccharomyces cerevisiae*. *Cell Stress Chaperones*, 21, 895–906. <https://doi.org/10.1007/s12192-016-0714-4> [in English].

Ren, J., Luo, J., Ma, H., Wang, X., & Ma, L.Q. (2013). Bioavailability and oxidative stress of cadmium to *Corbicula fluminea*. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 15 (4), 860–869. <https://doi.org/10.1039/c3em30288a> [in English].

Vance, D.E., & Vance, J.E. (2002). *Biochemistry of Lipids, Lipoproteins and Membranes*. 4th ed. Amsterdam : Elsevier [in English].

Отримано: 18.09.2023

Прийнято: 08.10.2023



УДК 594.3:591.122/127:543.395 (477.282)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.2>

**ВПЛИВ СИНТЕТИЧНИХ МИЮЧИХ ЗАСОБІВ НА ЛЕГЕНЕВЕ Й ПОВЕРХНЕВЕ
ДИХАННЯ АЛОВИДІВ *PLANORBARIUS* (SUPERSPECIES) *CORNEUS*
SENSU LATO (MOLLUSCA, GASTROPODA, PULMONATA, PLANORBIDAE)
ГІДРОМЕРЕЖІ УКРАЇНИ**

Л. Є. Астахова¹

Однією з екологічних проблем сьогодення є зростання токсичного впливу синтетичних миючих засобів на гідросферу Землі. Ці поллютанти добре розчиняються у воді й повільно розкладаються, тому здатні тривалий час зберігатись у гідроекосистемах. У водоймах України останнім часом рівень забруднення поверхневих вод синтетичними поверхнево-активними речовинами значно зріс, що зумовлює необхідність вивчення їхнього впливу на біоту. Як індикаторні об'єкти для визначення ступеня забруднення природних вод ксенобіотиками можуть бути використані молюски, зокрема витушка рогова як один із найпоширеніших і найчисельніших видів у гідромережі України. Цей молюск представлений надвидовим комплексом *Planorbarius* (*superspecies*) *corneus sensu lato*, який включає в себе два генетичні аловиди-вікаріанти – «західний» і «східний», що відрізняються один від одного морфологічними, анатомічними, хорологічними й екологічними особливостями. З метою з'ясування рівня токсичного впливу синтетичних миючих засобів на гідробіотів вивчено вплив різних концентрацій (10, 20, 30, 40, 50 мг/дм³) цих ксенобіотиків на показники легеневого та поверхневого дифузного дихання аловидів *Planorbarius* (*superspecies*) *corneus sensu lato*.

Для аловидів витушки рогової характерний комбінований бімодальний спосіб дихання. За легеневого дихання вони споживають кисень атмосферного повітря, а за поверхневого дифузного – кисень, розчинений у воді, який надходить перкутанно крізь тонкостінні мембрани епітеліальних клітин покривів тіла й адаптивної зябри. У піддослідних м'якунів за впливу застосованих концентрацій детергентів спостерігався стрімкий розвиток патологічного процесу їх отруєння, який представлений 5-ма фазами – латентною, стимулюючою, депресивною, сублетальною та летальною. З'ясовано, що значення досліджуваних показників обох способів дихання у «східного» аловиду були статистично вірогідно меншими порівняно з такими в аловиду «західного» ($p \leq 0,05-0,001$). Це свідчить про вищу чутливість і нижчу витривалість першого з них щодо дії використаних полютантів.

Ключові слова: витушки, детергенти, респірація, річкова система України.

¹ кандидат біологічних наук,
доцент кафедри ботаніки, біоресурсів та збереження біорізноманіття
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: lastahovazt@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1159-525X

INFLUENCE OF SYNTHETIC DETERGENTS ON THE PULMONARY AND DIRECT SURFACE RESPIRATION OF *PLANORBARIUS* (SUPERSPECIES) *CORNEUS SENSU LATO* ALLOSPECIES (MOLLUSCA, GASTROPODA, PULMONATA, PLANORBIDAE) OF THE HYDROLOGICAL NETWORK OF UKRAINE

L. Ye. Astakhova

*One of today's environmental problems is the growing toxic effect of synthetic detergents on the Earth's hydrosphere. These pollutants dissolve well in water and decompose slowly, so they can persist for a long time in hydroecosystems. Recently, the level of surface water pollution by synthetic surface-active substances has increased significantly in the reservoirs of Ukraine, which makes it necessary to study their impact on biota. Molluscs can be used as indicator objects to determine the degree of contamination of natural waters with xenobiotics, in particular, the horned clam as one of the most common and numerous species in the water network of Ukraine. This mollusc is represented by the superspecies complex *Planorbarius* (superspecies) *corneus sensu lato*, which includes two genetic vicariant allospecies – “western” and “eastern”, which differ in morphological, anatomical, chorological and ecological features. In order to find out the level of toxic effects of detergents on hydrobionts, the influence of different concentrations (10, 20, 30, 40, 50 mg/dm³) of these xenobiotics on the indicators of pulmonary and surface diffuse respiration of allospecies *P. corneus s. lato*. A combined bimodal way of breathing is characteristic of horned oysters. During lung breathing, they consume oxygen from the atmospheric air, and during superficial diffuse breathing, they consume oxygen dissolved in water, which enters percutaneously through the thin-walled membranes of the epithelial cells of the body coverings and adaptive gills. Under the influence of the applied concentrations of detergents, a rapid development of the pathological process of their poisoning, which is represented by 5 phases – latent, stimulating, depressive, sublethal and lethal, was observed in the experimental molluscs. It was found that the values of the investigated indicators of both methods of breathing in the “eastern” allospecies were statistically significantly lower compared to those in the “western” allospecies ($p \leq 0,05-0,001$). This indicates the higher sensitivity and lower endurance of the first of them to the effect of the used pollutants.*

Key words: *Planorbarius, detergents, respiration, river system of Ukraine.*

Вступ

Натепер якість середовища поверхневих вод України суттєво погіршилась через надходження неорганічних і органічних сполук, які порушують структурну цілісність водних екосистем. До числа одних із найпоширеніших забруднювачів водного середовища відносять різні синтетичні миючі засоби (далі – СМЗ). Джерелами забруднення водойм цими поліювантами є господарсько-побутові (використання СМЗ у побуті) та промислові стічні води (хімічне, нафтове, текстильне виробництво), а також стоки із сільськогосподарських угідь (застосування у складі пестицидів) (Романенко, 2001). До складу цих детергентів входять від 15 до 25% синтетичних поверхнево-активних речовин (далі – СПАР), для них характерні емульгувальні, диспергувальні й освітлювальні властивості. ПАР добре розчиняються у воді й повільно розкладаються, тому здатні тривалий час зберігатись у гідросфері (Стадниченко, 2005). Після потрапляння у водне середовище вони включаються у трофічні ланцюги

та колообіг речовин, водночас зазнають біологічного окиснення, їх концентрація у воді зменшується. Ці забруднювачі здійснюють багатовекторний вплив на водні екосистеми, а саме: змінюють фізико-хімічні властивості води (зумовляють специфічний запах, змінюють співвідношення катіонів і аніонів, погіршують кисневий режим), накопичуються в донних відкладах і спричиняють пряму токсичну дію на гідробіонтів, порушують у них перебіг фізіологічного-біохімічних процесів (Савлущинська та ін., 2013; Chandanshive, 2013; Mathew et al., 2013; Mousavi & Khodadoost, 2019; Logeswari et al., 2021; Toledo, 2021; Borah, 2022;). Відомо, що за дії визначених концентрацій СМЗ у прісноводних молюсків змінюються значення низки фізіологічних показників – фільтраційних (Уваєва, 2012, 2018), дихальних (Бабич і Стадниченко, 2022), гематологічних (Стадниченко і Янович, 2004; Бабич та ін., 2021), трофічних (Стадниченко, 2005). Також ці токсиканти спричиняють на водних тварин мутагенний, ембріотоксичний і гона-

дотоксичний вплив (Дудник і Євтушенко, 2013).

СМЗ у своєму складі містять аніоанактивні ПАР (алкілсульфонати й алкіларілсульфонати), гранично допустима концентрація (далі – ГДК) яких у природних водах становить 0,5 мг/дм³. Однак їх рівень у гідромережі України може сягати більших значень. Для оцінки шкідливого впливу токсичних речовин на якість водного середовища досить широко застосовують експериментальний метод – біотестування (Дідух, 2012). Як тест-об'єкти можуть бути використані різні гідробіоти та кількісні зміни їхніх життєво важливих функцій. Найчастіше біоіндикаторними видами слугують молюски, які є резистентними до токсичних речовин і здатні накопичувати їх у своєму тілі. М'якуни родини витушкові (Planorbidae) є постійними мешканцями прісних водойм, у яких часто формують масові поселення. Витушка рогова представлена надвидовим комплексом *Planorbarius (superspecies) corneus sensu lato*, що включає в себе два генетичні аловіди-вікаріанти – «західний» і «східний». Вони відрізняються один від одного морфологічними, анатомічними, хорологічними й екологічними особливостями та просто-риво розмежовані зоною інтрогресивної гібридизації (Гарбар, 2009; Гарбар та ін., 2020). Натепер мало відомостей про вплив СМЗ на дихальну функцію цих м'якунів, тому вивчення даного питання потребує детального дослідження.

Мета роботи полягала в з'ясуванні впливу поширених в Україні СМЗ – фосфатного «Savex» та безфосфатного «LOSK» – на показники легеневого та поверхневого дифузного дихання «західного» та «східного» аловидів *P. corneus s. lato*. На основі отриманих результатів важливо оцінити доцільність використання цих молюсків як біоіндикаторних об'єктів для визначення рівня токсичного забруднення водних екосистем СМЗ.

Матеріал і методи

Матеріалом дослідження слугували особини *P. corneus s. lato*, зібрані вручну в липні – серпні 2020 р.: з них 231 екз. аловиду «західного» з р. Інгул (м. Кропивницький Кіровоградської обл.: 48°34'05.9»N, 32°14'16.2»E) і 233 екз. аловиду «східного» з р. Конка (с. Козачі Лагери Херсонської обл.: 46°42'41.7»N, 32°59'01.2»E). Визначення видової належності м'якунів здійснено на основі дослідження конхіологічних особливостей згідно з (Гарбар, 2009).

У лабораторних умовах молюски підлягали 14-добовій акліматизації, об'єм акваріумів становив 30 л, щільність посадки м'якунів – 4 екз./л, температура води – 20–22 °С, її рН – 7,5–7,8, оксигенізація – 7,6–8,6 мг O₂/дм³. Оновлення середовища здійснювали через добу. Щоденний раціон тварин складався із суміші *Cladophora sp.* та *Myriophyllum spicatum L.*, узятих із місць збору м'якунів. Після закінчення акліматизації гідробіотів використовували для токсикологічних досліджень.

Основний і орієнтовний токсикологічні експерименти поставлені за стандартною методикою (Бабич і Пінкіна, 2021). За токсиканти взяті такі СМЗ: безфосфатний «LOSK» (Henkel, Польща) і фосфатний «Savex» («Фикосота» ООД, Болгарія) у концентраціях 10, 20, 30, 40, 50 мг/дм³. Тривалість експозиції – 7 діб.

Значення показників легеневого дихання аловидів *P. corneus s. lato* визначали за методикою, описаною в публікації (Uvayeva et al., 2022), за якою здійснювали цілодобові спостереження за тваринами як піддослідної, так і контрольної груп. В особин, у яких попередньо пронумерували черепашки, рахували добову кількість вдихів, їх тривалість і об'єм кожного з них. Тривалість вдиху реєстрували від миті спливання м'якунів під плівку поверхневого натягу води та перфорації її за допомогою пневмостома (для надходження атмосферного повітря в легенеvu порожнину) до миті повернення їх у товщу води. Також у цих особин одразу визначали об'єм їхнього вдиху. Для цього м'якунам гострою та довгою голкою швидко завдавали один за одним кілька різких уколів у м'яз ноги, водночас рахували кількість повітряних пухирців, які виділялися з їхніх легень у відповідь на спричинене подразнення. Такі операції здійснювали доти, доки очікувана реакція більше не відбувалась.

Інтенсивність поверхневого дифузного дихання з'ясовували непрямым методом, а саме: встановленням часу, протягом якого молюски виживали за відсутності в них можливості здійснення легеневого дихання. Для цього піддослідних особин поміщали на дно акваріумів у замкнених водонепроникних ємностях, які були виготовлені із сітчастої капронової делі та з умонтованими в їхнє дно металевими тягарями. Тварини були вимушені перебувати на дні акваріума та дихати лише розчиненим у воді киснем.

Цифрові результати досліджень опрацьовано методами базової варіаційної статистики (Hill & Lewicki, 2007).

Результати

Установлено, що значення показників як легеневого, так і поверхневого дифузного дихання аловидів витушки змінюються у прямій залежності від концентрації використаних токсикантів, статистично вірогідно зростають у межах останніх від 10 до 30 мг/дм³ включно та різко знижуються за їх 40 і 50 мг/дм³ (табл. 1). У піддослідних особин за впливу застосованих концентрацій детергентів спостерігався стрімкий розвиток патологічного процесу – отруєння. За концентрації 10 мг/дм³ використаних безфосфатних і фосфатних СМЗ значення показників обох способів дихання в аловидів *P. corneus s. lato* як піддослідної, так

і контрольної груп були досить близькими. Це характерно для латентної фази процесу отруєння – найпершої за проявом у часі та найтривалішої за перебігом реакції-відповіді піддослідних тварин на дію токсиканта. У м'якунів також не спостерігались зміни в їхній руховій і кормовій активності за впливу вищезазначеного токсичного середовища.

З підвищенням рівня концентрації СМЗ від 10 до 20 мг/дм³ у витушок неоднаковою мірою збільшувалися значення показників їхнього легеневого та поверхневого дихання. Добова кількість «вдихів», їхня тривалість і об'єм кожного з них за вищезазначених умов зросли в піддослідних м'якунів у середньому лише в 1,1 раз, а інтервал між «вдихами» – в 1,1–1,2 раза ($p \leq 0,05$). За рівня концентрації 30 мг/дм³

Таблиця 1
Вплив різних СМЗ на показники легеневого та поверхневого дихання аловидів *P. corneus s. lato*

СМЗ	Концентрація, мг/дм ³	n, екз.	Показники легеневого дихання				Показник дифузного дихання, год
			Кількість «вдихів» за добу	Інтервал між «вдихами», год	Тривалість «вдиху», год	Об'єм «вдиху», кількість пухирців	
			M ± m	M ± m	M ± m	M ± m	
Аловид «західний» (р. Інгул, м. Кропивницький Кіровоградської обл.)							
"Savex"	0	20	16,59 ± 1,24	56,61 ± 1,23	22,06 ± 1,31	20,12 ± 1,11	48,21 ± 2,39
	10	19	17,10 ± 1,18	54,75 ± 1,12	22,71 ± 1,24	20,89 ± 1,13	49,09 ± 2,12
	20	18	18,12 ± 1,25	49,43 ± 1,35*	24,51 ± 1,19	22,74 ± 1,25*	51,52 ± 3,25
	30	18	20,64 ± 1,31*	38,87 ± 1,41**	27,54 ± 1,23*	29,58 ± 1,18**	56,19 ± 2,82*
	40	19	13,15 ± 1,32*	86,58 ± 1,24**	15,48 ± 1,29**	12,16 ± 1,41**	23,46 ± 2,17**
	50	20	12,15 ± 1,28*	90,71 ± 1,16**	13,66 ± 1,38**	11,67 ± 1,16**	21,51 ± 3,74**
"LOSK"	0	20	16,64 ± 1,22	56,17 ± 1,25	22,21 ± 1,32	20,63 ± 1,26	48,33 ± 2,51
	10	20	17,49 ± 1,36	52,31 ± 1,22	22,88 ± 1,24	21,38 ± 1,33	49,62 ± 3,78
	20	19	18,83 ± 1,21	47,24 ± 1,05*	25,09 ± 1,25*	23,46 ± 1,42*	51,93 ± 3,64
	30	20	21,12 ± 1,17*	39,13 ± 1,25**	28,14 ± 1,10*	30,33 ± 1,25**	57,04 ± 3,15*
	40	19	13,57 ± 1,30*	84,29 ± 1,36**	16,82 ± 1,28**	13,31 ± 1,31**	24,77 ± 2,13**
	50	19	12,91 ± 1,32*	86,62 ± 1,23**	14,25 ± 1,11**	12,44 ± 1,24**	22,16 ± 3,62**
Аловид «східний» (р. Конка, с. Козачі Лагері Херсонської обл.)							
"Savex"	0	20	14,35 ± 1,31	73,51 ± 1,29	19,38 ± 1,25	17,16 ± 1,06	40,31 ± 2,82
	10	19	14,84 ± 1,45	70,62 ± 1,05	20,02 ± 1,21	18,12 ± 1,12	41,47 ± 3,13
	20	20	15,55 ± 1,24	61,46 ± 1,11*	22,16 ± 1,25*	20,29 ± 1,36*	43,28 ± 2,64
	30	20	17,21 ± 1,06*	52,22 ± 1,27**	25,26 ± 1,41**	25,78 ± 1,16**	47,12 ± 3,02*
	40	19	10,71 ± 1,19*	112,16 ± 1,13**	12,37 ± 1,15**	10,26 ± 1,23**	18,05 ± 2,89**
	50	19	9,43 ± 1,02**	128,41 ± 1,34**	10,44 ± 1,12**	9,14 ± 1,48**	17,34 ± 2,66**
"LOSK"	0	20	14,49 ± 1,05	72,02 ± 1,41	19,81 ± 1,31	17,59 ± 1,03	40,42 ± 2,21
	10	20	15,14 ± 1,17	68,72 ± 1,29	20,68 ± 1,05	18,72 ± 1,32	41,63 ± 3,18
	20	19	16,17 ± 1,18	57,16 ± 1,28*	23,08 ± 1,21*	21,11 ± 1,38*	43,94 ± 2,72
	30	19	18,04 ± 1,11*	49,41 ± 1,30**	26,15 ± 1,02**	26,44 ± 1,47**	48,14 ± 3,15*
	40	18	11,14 ± 1,18*	108,13 ± 1,10**	13,11 ± 1,22**	10,88 ± 1,24**	19,16 ± 3,72**
	50	20	10,12 ± 1,16*	123,46 ± 1,25**	11,38 ± 1,22**	9,82 ± 1,39**	18,21 ± 2,48**

Примітки: M ± m – значення індексу та стандартна похибка до нього; * – статистично значима різниця ($p \leq 0,05$); ** – висока статистично значима різниця ($p \leq 0,001$).

застосованих полютантів у тварин спостерігалось подальше підвищення значень перших трьох вищезгаданих показників їх легеневої активності в 1,2–1,3, а останнього – в 1,2–1,3 раза відповідно ($p \leq 0,05–0,001$). Значення показників дифузного дихання в обох досліджуваних аловидів зросло в 1,1–1,2 раза. Також у піддослідних об'єктів у межах концентрацій токсиканта 20–30 мг/дм³ відмічено посилену активність рухової та кормової поведінок. Такі ознаки характерні для наступної фази отруєння – стимуляції. Водночас піддослідні молюски зберігали свою життєспроможність через максимальне можливе піднесення ними рівня їхньої фізіологічної активності.

Збільшення концентрацій застосованих СМЗ до рівня 40 і 50 мг/дм³ спричинило у витушок розвиток гострого отруєння, яке проявлялось у них стрімким перебігом однієї за одною кінцевих фаз патологічного процесу. Найтривалішої з них депресивної та значно швидкоплинніших двох останніх – сублетальної та летальної. За депресивної фази в піддослідних тварин порівняно з контролем скорочувалися значення показників обох властивих їм способів дихання – добової кількості «вдихів» в 1,2–1,3, інтервалу між «вдихами» – в 1,5, тривалості й об'єму останніх – в 1,3–1,6 і в 1,5–1,7 раза відповідно ($p \leq 0,05–0,001$). Виживаність особин, які не мали змоги здійснювати легеневе дихання, в аловиду «західного» зменшувалась у 2,0–2,1, а в аловиду «східного» – у 2,1–2,2 рази ($p \leq 0,001$). На сублетальній фазі спостерігалось часткове відмирання піддослідних тварин, а летальна фаза завжди супроводжувалась 100%-ою смертністю їх особин унаслідок задухи, яка була спричинена руйнацією легеневого та покривного респіраторного епітелію молюсків.

Обговорення

Генетичні аловиди-вікаріанти *P. corneus* s. lato як представники легеневих черевоних молюсків (Pulmonata) належать до групи тих гідробіонтів, які відзначаються бімодальним способом дихання. Значну частину необхідного для забезпечення своєї життєдіяльності кисню вони отримують через легені (кисень атмосферного повітря), друга ж його частина (розчинений у воді кисень) поглинається ними дифузно – через покриви тіла.

Легенева порожнина в цих тварин розміщена між середньою лінією нирки та попе-

речною мантийною складкою, яка утворює дно їхньої надпотиличної порожнини. Стеля легеневої порожнини густо пронизана кровоносними судинами – розгалуженнями легеневої вени. Легенева порожнина сполучається з навколишнім середовищем через рухомий дихальний (пневмостомальний) сифон, розміщений на правому боці їхнього тіла. Він утворений заокруглено-трикутною складкою мантиї, бічні краї якої піднесені догори та загорнуті на спинний бік тіла цих тварин. В основі дихального сифону міститься масивне залозисте поле – ділянка, утворена потужним шаром залозистого епітелію. Його слизовий секрет слугує не тільки для зволоження безпосередньо внутрішньої поверхні пневмостомального сифону, але й для зволоження стінок легеневої порожнини (Babych et al., 2023).

Отримані значення досліджуваних показників обох способів дихання «західного» і «східного» аловидів за впливу вжитих до них безфосфатних і фосфатних миючих засобів свідчать, що аловид «східний» більш чутливий до дії на нього цих токсикантів порівняно з аловидом «західним». Це може бути наслідком поширення їх у різних умовах існування. Адже в межах ареалу аловиду «західного» кількість посушливих діб на рік не перевищує 1%, тоді як на півночі ареалу аловиду «східного» цей показник становить 1–10%, а в південніших його ділянках він нерідко перевищує 10% його значення. Посилені з кожним роком кліматичні зрушення в Україні можуть відбитися на значеннях показників природних умов обох аловидів витушки рогової та призвести до суттєвого скорочення та фрагментування їх площ.

Висновки

Показники легеневого та поверхневого дифузного дихання спричиняють в аловидів *P. corneus* s. lato чітку залежність від ужитих концентрацій СМЗ у середовищі перебування піддослідних тварин. Токсикорезистентність аловиду «східного» щодо застосованих до нього токсикантів є нижчою порівняно з характерною для аловиду «західного». Тому він більш схильний регресувати в умовах посиленого забруднення навколишнього середовища.

Аловиди витушки рогової можуть бути рекомендовані як індикаторні об'єкти для використання їх у системі біомоніторингу, функціями-мішенями варто розцінювати показники як легеневого, так і поверхневого дифузного дихання цих м'якунів.

Список використаної літератури

- Бабич Ю., Пінкіна Т. Вплив іонів важких металів на екотоксикологічні показники витушки рогової (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata, Vulinidae). *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2021. Вип. 84. С. 76–83. <https://doi.org/10.30970/vlubs.2021.84.07>
- Бабич Ю.В., Стадниченко А.П. Вплив фосфатного миючого засобу «Savex» на показники легеневого дихання аловидів *Planorbarius corneus* s. lato (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata, Planorbidae) гідромережі України. *Біологічні дослідження – 2022* : зб. наук. пр. Житомир : ПП «Євро-Волинь», 2022. С. 79–81.
- Бабич Ю.В., Ковалевська О.О., Залужний В.Я., Махневич Д.С., Стадниченко А.П. Вплив різних концентрацій СМЗ «Вухатий нянь» на стабільність гомеостазу внутрішнього середовища «західного» аловиду витушки (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata, Vulinidae). *Актуальні питання біологічної науки* : зб. статей. Ніжин : НДУ імені Миколи Гоголя, 2021. С. 85–87.
- 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 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.
- Дідух Я.П. Основи біоіндикації. Київ : Наукова думка, 2012. 360 с.
- Дудник С.В., Євтушенко М.Ю. Водна токсикологія: основні теоретичні положення та їхнє практичне застосування: навч. посіб. Київ : Вид-во Укр. фітосоціол. центру, 2013. 297 с.
- Романенко В. Д. Основи гідроекології. Київ : Обереги, 2001. 728 с.
- Савлущинська М.О., Горбатюк Л.О., Платонов О.М., Пасічна О.О., Бурмістренко С.П., Куця І.Г., Каглян Н.М., Арсан О.М. Фосфор мийних засобів та його вплив на водяні організми (огляд). *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія Біологія*. 2013. Т. 56, № 3. С. 119–125.
- Стадниченко А.П. Вплив поверхнево-активних речовин і трематодної інвазії на живлення і травлення рогової витушки (Mollusca: Pulmonata: Vulinidae). *Вісник Державного агроекологічного університету*. 2005. № 2(15). С. 120–125.
- Стадниченко А.П., Янович Л.М. Вплив поверхнево-активних речовин на вміст глюкози у різних органах перлівниці (Mollusca: Unionidae). *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Біологія*. 2004. Вип. 15. С. 1–3.
- Уваєва О.І. Вплив безфосфатного детергента на фільтраційну роботу калюжниці болотяної. *Екологічні науки*. 2018. Т. 2, № 1 (20). С. 86–91.
- Уваєва О.І. Порушення очищувальної роботи *Viviparus contectus* (Mollusca: Opisthobranchia: Viviparidae) за сумісної дії детергентів та трематодної інвазії. *Науковий вісник Волинського національного університету ім. Лесі Українки. Біологічні науки*. 2012. Т. 27, № 2. С. 45–49.
- Babych Yu., Kyrychuk G., Romaniuk R., Stadychenko A., Uvayeva O. Impact of some mineral fertilizers on the pulmonary and direct surface respiration of the allospecies of *Planorbarius corneus* superspecies (Gastropoda: Pulmonata: Planorbidae) from the Ukrainian water bodies. *Folia Malacologica*. 2023. V. 31, № 1. P. 9–18. <https://doi.org/10.12657/folmal.031.002>
- Borah S. Adverse Effects of Different Detergents on Fish: A Review. *Research & Reviews: Journal of Ecology and Environmental Sciences*. 2022. Vol. 10, № 2. P. 1–15. <https://doi.org/10.4172/2347-7830.10.02.001>
- Chandanshive N.E. Studies on toxicity of detergents to *Mystus montanus* and change in behaviour of fish research journal of animal. *Veterinary and fishery science*. 2013. Vol. 1, № 9. P.14–19.
- Hill T., Lewicki P. Statistics. Methods and Applications. StatSoft, Tulsa, 2007.
- Logeswari D., Kandhasamy K., Majeeth F. A., Rajasekara P. M., Sharmila B. G. Effect of sub-lethal concentrations of commercial detergents on the protein content of selective freshwater fishes. *Bulletin of Pure & Applied Sciences- Zoology*. 2021. Vol. 40a, №1. P. 127–139. <https://doi.org/10.5958/2320-3188.2021.00016.4>
- Mathew E., Sunitha P.T, Thomas P.L. Effect of different concentration of detergent (Surf) on dissolved oxygen consumption in *Anabas testudineus*. *IOSR journal of environmental science, toxicology and food technology*. 2013. Vol. 5, № 3. P. 1–3. <https://doi.org/10.9790/2402-0530103>

Mousavi S.A., Khodadoost F. Effects of detergents on natural ecosystems and wastewater treatment processes: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26. P. 26439–26448. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05802-x>

Toledo N.A.B., Contreras C.H., Corredor C.A.A., Pérez C.A.R. Effect of biodegradable detergents on water quality. *Natural Volatiles and Essential Oils*. 2021. Vol. 8, № 5. P. 12080–12095.

Uvayeva O.I., Stadnychenko A.P., Babych Yu.V., Andriychuk T.V., Maksymenko Yu.V., Vyskushenko D.V., Ignatenko O.O., Pinkina T.V. Influence of some heavy metals to the pulmonary and direct diffusive respiration of the great ramshorn *Planorbarius corneus* allospecies (Mollusca: Gastropoda: Planorbidae) from the Ukrainian river system. *Ecologica Montenegrina*. 2022. V. 52. P. 49–59. <https://dx.doi.org/10.37828/em.2022.52.9>

References (translated & transliterated)

Babych, Ju., & Pinkina, T. (2021). Vplyv ioniv vazhkykh metaliv na ekotoksikologichni pokaznyky vytushky roghovoji (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata, Bulinidae) [Influence of heavy metal ions on ecotoxicological indicators of *Planorbarius corneus* (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata, Bulinidae)] *Visnyk Ljvivskogo universytetu. Serija biologichna [Visnyk of the Lviv University. Series Biology]*. 84, 76–83. <https://doi.org/10.30970/vlubs.2021.84.07> [in Ukrainian].

Babych, Ju.V., & Stadnychenko, A.P. (2022). Vplyv fosfatnogho myjuchogho zasobu «Savex» na pokaznyky leghenevogho dykhannja aloydiv *Planorbarius corneus* s. lato (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata, Planorbidae) ghidromerezhi Ukrainy [The influence of the phosphate detergent “Savex” on the parameters of pulmonary respiration of allospecies *Planorbarius corneus* s. lato (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata, Planorbidae) of the water network of Ukraine]. *Zbirnyk naukovykh prats “Biologichni doslidzhennia – 2022” [Collection of scientific works “Biological research – 2022”]*. Zhytomyr, 79–81 [in Ukrainian].

Babych, Ju.V., Kovalevsjka, O.O., Zaluzhnyj, V.Ja., Makhnevych, D.S., & Stadnychenko, A.P. (2021). Vplyv riznykh koncentracij SMZ «Vukhatyj njanj» na stabilnistj ghomeostazu vnutrishnjogho seredovyshha «zakhidnogho» aloydu vytushky (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata, Bulinidae) [The effect of different concentrations of the “Eared Nanny” SMZ on the stability of the internal environment of the “western” allospecies mollusc (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata, Bulinidae)] *Zbirnyk statej “Aktualjni pytannja biologichnoji nauky” [Collection of articles “Current issues of biological science”]*. Nizhyn, 85–87 [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 Uzhghorodskogo universytetu. Serija Biologhija [Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series Biology]*. 26, 56–61 [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 allospecies *Planorbarius corneus* under conditions of climate change]. *Zbirnyk naukovykh prats “Biologichni doslidzhennia – 2020” [Collection of scientific works “Biological research – 2020”]*. Zhytomyr, 150–153 [in Ukrainian].

Didukh, Ja.P. (2012). Osnovy bioindykacii [Basics of bioindication]. Naukova dumka. Kyiv. 360 [in Ukrainian].

Dudnyk, S.V., & Jevtushenko, M.Ju. (2013). Vodna toksykologhija: osnovni teoretychni polozhennja ta jikhnje praktychne zastosuvannja [Aquatic toxicology: basic theoretical principles and their practical application]. Publishing House of the Ukrainian Phytosociological Center. Kyiv. [in Ukrainian].

Romanenko, V.D. (2001). Osnovy ghidroekologhiji [Basics of hydroecology]. Obereghy. Kyiv. 728 [in Ukrainian].

Savluchynsjka, M.O., Ghorbatjuk, L.O., Platonov, O. M., Pasichna, O.O., Burmistrenko, S.P., Kuklja, I.Gh., Kaghlan, N.M., & Arsan, O.M. (2013). Fosfor myjnykh zasobiv ta jogho vplyv na vodjani orghanizmy (oghljad) [The influence of phosphorus from detergents on aquatic animals (a review)]. *Naukovi zapysky Ternopiljskogo nacionalnogho pedagoghichnogho universytetu imeni Volodymyra Ghnatjuka [Scientific Issue Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University]*. 56 (3), 119–125 [in Ukrainian].

Stadnychenko, A.P. (2005). Vplyv poverkhnevo-aktyvnykh rehovyn i trematodnoji invaziji na zhyvlennja i travlennja roghovoji vytushky (Mollusca: Pulmonata: Bulinidae) [The effect of surface-ac-

tive substances and trematode infestation on feeding and digestion of the horned snail (Mollusca: Pulmonata: Bulinidae)]. *Visnyk Derzhavnogho aghroekologhichnogho universytetu [Bulletin of the State Agroecological University]*. 2(15), 120–125 [in Ukrainian].

Uvajeva, O.I. (2018). Vplyv bezfosfatnogho deterghenta na filjtracijnu robotu kaljuzhnyci bolot-janoji [The effect of phosphate-free detergent on the filtration performance of a marsh pond]. *Ekologhichni nauky [Environmental sciences]*. 2 (1), 86–91 [in Ukrainian].

Uvajeva, O.I. (2012). Porushennja ochyshhuvaljnoji roboty *Viviparus contectus* (Mollusca: Opisthobranchia: Viviparidae) za sumisnoji diji deterghentiv ta trematodnoji invaziji [Violation of the cleaning work of *Viviparus contectus* (Mollusca: Opisthobranchia: Viviparidae) under the combined action of detergents and trematode infestation]. *Naukovyj visnyk Volyns'koghho nacional'noghho universytetu im. Lesi Ukrajin'ky [Lesya Ukrainka Eastern European National University Scientific Bulletin]*. 27 (2), 45–49 [in Ukrainian].

Babych, Yu., Kyrychuk, G., Romaniuk, R., Stadnychenko, A., & Uvayeva, O. (2023). Impact of some mineral fertilizers on the pulmonary and direct surface respiration of the allospecies of *Planorbarius corneus* superspecies (Gastropoda: Pulmonata: Planorbidae) from the Ukrainian water bodies. *Folia Malacologica*. 31 (1), 9–18. <https://doi.org/10.12657/folmal.031.002> [in English].

Borah, S. (2022). Adverse Effects of Different Detergents on Fish: A Review. *Research & Reviews: Journal of Ecology and Environmental Sciences*. 10 (2), 1–15. <https://doi.org/10.4172/2347-7830.10.02.001> [in English].

Chandanshive, N.E. (2013). Studies on toxicity of detergents to *Mystus montanus* and change in behaviour of fish research journal of animal. *Veterinary and fishery science*. 1 (9), 14–19 [in English].

Hill, T., & Lewicki, P. (2007). *Statistics. Methods and Applications*. Tulsa. StatSoft [in English].

Logeswari, D., Kandhasamy, K., Majeeth, F. A., Rajasekara, P. M., & Sharmila, B.G. (2021). Effect of sublethal concentrations of commercial detergents on the protein content of selective freshwater fishes. *Bulletin of Pure & Applied Sciences- Zoology*. 40a (1), 127–139. <https://doi.org/10.5958/2320-3188.2021.00016.4> [in English].

Mathew, E., Sunitha, P.T., & Thomas, P.L. (2013). Effect of different concentration of detergent (Surf) on dissolved oxygen consumption in *Anabas testudineus*. *IOSR journal of environmental science, toxicology and food technology*. 2013. 5(3), 1–3. <https://doi.org/10.9790/2402-0530103> [in English].

Mousavi, S.A., & Khodadoost, F. (2019). Effects of detergents on natural ecosystems and wastewater treatment processes: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 26, 26439–26448. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05802-x> [in English].

Toledo, N.A.B., Contreras, C.H., Corredor, C.A.A., & Pérez, C.A.R. (2021). Effect of biodegradable detergents on water quality. *Natural Volatiles and Essential Oils*. 8 (5), 12080–12095 [in English].

Uvayeva, O.I., Stadnychenko, A.P., Babych, Yu.V., Andriychuk, T.V., Maksymenko, Yu.V., Vyskushenko, D.V., Ignatenko, O.O., & Pinkina, T.V. (2022). Influence of some heavy metals to the pulmonary and direct diffusive respiration of the great ramshorn *Planorbarius corneus* allospecies (Mollusca: Gastropoda: Planorbidae) from the Ukrainian river system. *Ecologica Montenegrina*. 52, 49–59. <https://dx.doi.org/10.37828/em.52.9> [in English].

Отримано: 03.09.2023

Прийнято: 01.10.2023



УДК 612.122

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.3>

ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СЕРЦЕВО-СУДИННОЇ СИСТЕМИ ДІТЕЙ 7–9 РОКІВ ПІСЛЯ ЗАХВОРЮВАННЯ НА COVID-19 (НА ПРИКЛАДІ СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ)

П. А. Василега¹

Нещодавнє поширення коронавірусної хвороби 2019 (COVID-19), спричиненої вірусом тяжкого гострого респіраторного синдрому 2 (SARS-CoV-2) у Китаї, стало глобальною проблемою громадського здоров'я. У людей з наявними серцево-судинними захворюваннями (ССЗ) є вищий ризик інфікування COVID-19, що пов'язано з різноманітними прямими та непрямими ускладненнями, як-от міокардит, гостре ушкодження міокарда, венозна тромбоемболія й аритмія. Середня тривалість інкубаційного періоду становить 6,4 днів, а типові симптоми включають лихоманку, кашель, одиночну дихальну недостатність, м'язовий біль або втоми. Хоча більшість пацієнтів мають легку форму захворювання, у деяких хворих може розвиватись важка гіпоксія, що потребує госпіталізації та механічної вентиляції легень.

Мета дослідження було дослідити особливості функціонування серцево-судинної системи дітей 7–9 років, які перехворіли на COVID-19.

Стан серцево-судинної системи визначали за такими показниками: за частотою серцевих скорочень, артеріальним тиском (систоличний і діастолічний), пульсовим тиском, систолічним об'ємом крові, хвилинним об'ємом крові. Отримані дані пройшли статистичну обробку.

У результаті проведеного аналізу показників стану серцево-судинної системи у хлопчиків 7–9 років, які перехворіли на COVID-19, було зазначено тенденцію до збільшення майже всіх показників. Тільки у групі хлопчиків 7 років спостерігалось зменшення показників частоти серцевих скорочень, систолічного об'єму крові та ХОК, які становили 2,4, 1,8, 3,7% відповідно. У дівчаток 7–9 років, які перехворіли на COVID-19, показники стану серцево-судинної системи характеризувались різноспрямованими змінами, у бік як збільшення (частота серцевих скорочень, артеріальний систолічний і діастолічний тиск), так і зменшення (пульсовий тиск, систолічний об'єм крові, хвилинний об'єм крові). Більш виражені зміни в показниках стану серцево-судинної системи характерні для хлопчиків 8 років, які перехворіли на COVID-19. Подібна закономірність спостерігалась і в дівчаток, але мала менш виражений характер і лише для параметрів, які характеризували діяльність серця.

Дане дослідження є частиною науково-дослідної роботи «Стан функціональних систем в умовах формування адаптаційних реакцій та ефектів біологічно активних сполук за цих умов», державна реєстрація № 0123U100614.

Ключові слова: серцево-судинна система, дитяче населення, гострі респіраторні вірусні інфекції, пульс, артеріальний тиск, систолічний об'єм крові, хвилинний об'єм крові, COVID-19.

¹ аспірант

(Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя, м. Ніжин)

e-mail: p.vasyleha@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7758-9974

FEATURES OF CARDIOVASCULAR SYSTEM FUNCTIONING IN CHILDREN AGED 7–9 YEARS AFTER COVID-19 INFECTION (ON THE EXAMPLE OF SUMY REGION)

P. A. Vasyleha

The recent emergence of the coronavirus disease 19 (COVID-19) caused by severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) in China is now a global health emergency. There is a higher risk of COVID-19 infection among those with preexisting cardiovascular diseases (CVD), and it has been connected with various direct and indirect complications, including myocarditis, acute myocardial injury, venous thromboembolism, and arrhythmias. The average incubation period is 6.4 days and presenting symptoms typically include fever, cough, dyspnea, myalgia or fatigue. While the majority of patients tend to have a mild illness, a minority of patients develop severe hypoxia requiring hospitalization and mechanical ventilation.

Research objective: to investigate the characteristics of cardiovascular system activity in children aged 7–9 years who have recovered from COVID-19.

The state of the cardiovascular system was determined using the following indicators: heart rate, systolic and diastolic arterial blood pressure, pulse pressure, stroke volume, and cardiac output. The obtained data underwent statistical processing.

Analyzing cardiovascular system indicators in boys aged 7–9 who have had COVID-19, a trend towards an increase in almost all indicators was observed. Only in the group of 7-year-old boys was a decrease in heart rate (HR), systolic blood pressure (SBP), and hematocrit (Hct) noted, which amounted to 2,4, 1,8, and 3,7%, respectively. In girls aged 7–9 who had COVID-19, the indicators of the cardiovascular system were characterized by changes in different directions, both towards an increase (HR, systolic and diastolic blood pressure) and towards a decrease (pulse pressure, stroke volume, hematocrit).

More pronounced changes in cardiovascular system indicators are typical for 8-year-old boys who have had COVID-19. A similar pattern was observed in girls, but it had a less pronounced character and only affected parameters related to cardiac activity.

This study is part of the research project titled “Functional Systems’ State in the Context of Adaptation Reactions and Effects of Biologically Active Compounds under these Conditions”, registered under the number 0123U100614.

Key words: cardiovascular system, children’s population, acute respiratory viral infection, heart rate, blood pressure, systolic blood volume, minute blood volume, COVID-19.

Вступ

Вірус SARS-CoV-2 є більше патогенним порівняно із SARS-CoV та MERS-CoV. Дані епідеміологічних досліджень стверджують, що більшість дітей, інфікованих SARS-CoV-2 та хворих на COVID-19, можуть цілком одужати.

У дослідженнях M.S. Khan et al. зазначено, що між COVID-19 і грипом є значна кількість подібних клінічних ознак, також наявні важливі відмінності. Так, пацієнти з наявними серцево-судинними захворюваннями мають більший ризик тяжкого перебігу ГРВІ, зокрема й COVID-19. Від 15 до 70% летальних випадків від COVID-19 пов’язані із захворюваннями серцево-судинної системи (Duan et al., 2020; Khan et al., 2020).

Виявлено, що COVID-19 впливає на серцеві релевантні біохімічні шляхи, як-от сигнальний шлях ACE2, що спричиняє функціональну дисфункцію міокарда. З наукових джерел відомо, що активна експресія ангіотензинперетворювального ензиму 2-го типу (ACE2) спостерігається в серці, легенях, нирках і шлунково-кишковому тракті. Він також відіграє важливу роль у нейрогумо-

ральній регуляції серцево-судинної системи. Зв’язування SARS-CoV-2 з ACE2 спричиняє гостре ураження міокарда та легенів через зміну сигнальних шляхів ACE2 (Li W et al., 2003; Василега, 2023).

Ураження серцево-судинної системи внаслідок COVID-19 також зумовлене пониженою оксигенацією міокарда (Bansal, 2020; Ждан та ін., 2022). У дітей спостерігається занижений рівень синтезу або функціональної активності ACE2, що забезпечує більшу протекцію серцево-судинної системи в дитячому організмі (Ogimi et al., 2019; Маслюк та ін., 2022).

Отже, можемо сформулювати припущення, що серцево-судинна система дітей може мати особливості функціонування навіть після остаточного одужання. Можливо, такі функціональні особливості нівелюються із часом, якщо, звісно, не розвивається постковід.

Британський національний інститут охорони здоров’я та якості догляду (NICE) за погодженням із Шотландською міжвишівською мережею посібників (SIGN) і Королівським коледжем лікарів загальної практики (RCGP) у своїх клінічних посібни-

ках від 30 жовтня 2020 р. уперше описав такі форми COVID-19:

- гострий COVID-19 – симптоми хвороби та скарги хворих реєструються до 4 тижнів;
- симптоматичний COVID-19, що триває (ongoing symptomatic), – симптоми хвороби та скарги хворих реєструються в період від 4 до 12 тижнів;
- синдром постковіду – скарги та симптоми, які розвиваються в період перебігу або після COVID-19 і тривають понад 12 тижнів, ці симптоми не є наслідком іншої патології.
- Найбільш поширені симптоми, що спостерігались у дітей шкільного віку, були слабкість і втома (46,3%), задишка (менш як 20,4%), також пониження щоденної працездатності (9,4%). 50% учнів середньої школи, попри наявність симптомів, які реєструвались понад 4-и тижні після зараження SARS-CoV-2, відвідували навчальний заклад у звичайному режимі (NICE, 2020).
- Мета дослідження – розглянути особливості діяльності серцево-судинної системи дітей 7–9 років, які перехворіли на COVID-19.

Матеріал і методи

Стан серцево-судинної системи визначали за такими показниками: частота серцевих скорочень (далі – ЧСС), систолічний і діастолічний артеріальний тиск, пульсовий тиск, систолічний об'єм крові (далі – СОК), хвилинний об'єм крові (далі – ХОК). Частоту серцевих скорочень визначали у стані відносного спокою. У спокої ЧСС фіксували пульсотометром "Polar F52c", пальпаторно, а також за допомогою комплексу «Варікард 2.51». Вимірювання величин артеріального тиску проводили з використанням методу Н.С. Короткова в положенні сидячи (Сенаторова, 2014; Кумар та ін., 2023). Вимірювання вказаних показників проводилося тричі, для статистичної обробки обирали середні значення. Математична та статистична обробка даних проводилась за допомогою програми STATISTICA 8.0. Первинна підготовка проміжних розрахунків проводилась пакетом Microsoft Excel 2016. Для кількісних показників розраховували середнє арифметичне (M) і стандартну помилку середнього (m).

Дослідження проводилось на базі Юнаківського ЗЗСО I–III ступенів (Сумський р-н Сумської обл.) з 1 вересня 2021 р. по 15 лютого 2022 р.) та Сумського ЗЗСО I–III ступенів № 19 ім. М.С. Нестеровського

Сумської міської ради (з 1 вересня 2021 р. по 15 лютого 2022 р.). Також у дослідженні взяли участь волонтери, що зумовлено особливостями проведення дослідження в період карантинних обмежень. Усі учасники в період дослідження мешкали в межах Сумського району Сумської області.

Дослідження проведено у групі дітей 7–9 років, загальна кількість досліджуваних – 341 особа, серед яких є хлопчики та дівчатка. Для більшої достовірності дослідження в ньому брали участь діти без наявних хронічних або інших захворювань. Контрольну групу представляють діти, які є практично здоровими та не хворіли на COVID-19 чи інші ГРВІ в досліджуваному сезоні (150 осіб). Інша група представлена дітьми, які перехворіли на COVID-19, що підтверджується лікарняною довідкою або тестуванням ПАР. Щоб узяти до уваги вікові та статеві особливості, усіх учасників поділили на підгрупи за віком і статтю. У контрольну групу ввійшли 150 учасників, з них 75 дівчаток і 75 хлопчиків. Група учасників, які перехворіли на COVID-19, складалась зі 191 учасника. У дослідженні взяли участь 94 хлопчики віком 7–9 років, 97 дівчаток віком 7–9 років.

Робота виконана відповідно до «Етичних принципів медичних досліджень за участю людини як об'єкта дослідження» Гельсінської декларації (Гельсінська ..., 2008), Загальної декларації з біоетики та прав людини (Загальна, 2012), законодавства України. Усі волонтери підписали інформовану згоду на участь у дослідженні.

Результати та їх обговорення

Дані дослідження показників функціонального стану серцево-судинної системи хлопчиків 7–9 років представлені в таблиці 1.

У таблиці 1 наведені дані, що характеризують показники серцево-судинної діяльності у хлопчиків, які перехворіли на COVID-19. У результаті проведеного аналізу показників стану серцево-судинної системи у хлопчиків 7–9 років, які перехворіли на COVID-19, було зазначено тенденцію до збільшення майже всіх показників. Тільки у групі хлопчиків 7 років спостерігалось зменшення показників ЧСС, СОК та ХОК, які становили 2,4, 1,8, 3,7% відповідно.

Характеристики артеріального кров'яного тиску мали достовірне збільшення. Так, зареєстроване збільшення систолічного та діастолічного тиску порівняно із групою контролю на 8,0 і 7,3% відповідно.

Таблиця 1

Показники функціонального стану серцево-судинної системи у хлопчиків, які перехворіли на COVID-19

Показники	Хлопчики, контрольна група			Хлопчики, які перехворіли на COVID-19		
	7 років n – 25	8 років n – 25	9 років n – 25	7 років n – 30	8 років n – 31	9 років n – 33
1. Частота серцевих скорочень, уд./хв	92,05 ± 3,12	85,97 ± 3,15	88,67 ± 3,23	90,25 ± 3,30	91,80 ± 3,45*	92,92 ± 3,40
2. Систолічний арт. тиск, мм рт. ст.	95,96 ± 2,30	95,85 ± 2,50	100,07 ± 2,00	103,65 ± 2,20	105,40 ± 2,15**	105,60 ± 2,40*
3. Діастолічний арт. тиск, мм рт. ст.	57,55 ± 1,21	59,67 ± 1,50	61,00 ± 1,12	61,80 ± 1,12*	62,50 ± 1,60	62,45 ± 1,70
4. Пульсовий тиск, мм рт. ст.	38,41 ± 1,75	36,18 ± 2,00	39,07 ± 1,56	41,85 ± 1,72*	42,90 ± 1,87***	43,15 ± 2,05**
5. Систолічний об'єм крові, мл	47,07 ± 1,48	47,89 ± 1,75	51,73 ± 1,34	46,24 ± 1,43	49,50 ± 1,73	52,90 ± 1,87
6. Хвилинний об'єм крові, мл	4 332,79 ± 146,85	4 117,1 ± 150,85	4 586,89 ± 167,08	4 173,16 ± 152,59	4 544,1 ± 170,77 **	4 915,4 ± 179,86*

Примітка: достовірні зміни щодо контрольної групи * > 5%.

Показники пульсового тиску також мали достовірні зміни, що становили 8,55% у бік збільшення показника.

У хлопчиків 8-ми років, що перехворіли на COVID-19, виявлені достовірні зміни в показниках ЧСС, систолічного, діастолічного та пульсового тиску в порівнянні з даними контрольної групи. Абсолютні числа, що характеризували СОК та ХОК, виявляють тенденцію до збільшення в порівнянні із практично здоровими хлопчиками 8-ми років. Відносні числа, що характеризують зміни ЧСС, систолічного, діастолічного, пульсового тиску, СОК та ХОК, мали спрямований у бік збільшення характер: 6,8, 10, 4,7, 18,6, 3,4 та 10,4% відповідно, у порівнянні з контрольними показниками. Тенденцію до збільшення СОК забезпечує незначне зростання ЧСС.

Стосовно показників серцево-судинної діяльності у хлопчиків 9 років, які перехворіли на COVID-19, ми виявили достовірні збільшення абсолютних і відносних чисел ЧСС, систолічного, діастолічного, пульсового тиску, ХОК в порівнянні з контролем, вони становили 4,8, 5,5, 2,37, 10,44, 7,16% відповідно.

Отже, відносні зміни, що характеризують показники серцево-судинної діяльності у хлопчиків 9-ти років, аналогічні змінам, що й у хлопчиків 8-ми років, але мають менш виражений характер.

У таблиці 2 наведені дані, що характеризують показники серцево-судинної системи дівчаток, які перехворіли на COVID-19.

Було виявлено, що в семирічних дівчаток спостерігається зменшення відносних показників діастолічного артеріального та пульсового тиску, СОК та ХОК, які становлять 7,33, 9,5, 7,9, 5,07% відповідно. Стосовно показників ЧСС і систолічного артеріального тиску спостерігається незначне збільшення, що становить 3,01, 1,07% відповідно.

У дівчаток 8-ми років спостерігались достовірні зміни в показниках систолічного, діастолічного, пульсового тиску в порівнянні з контролем. Пульсовий, систолічний тиск, ХОК характеризувалися зменшенням абсолютних величин у порівнянні із практично здоровими дівчатками контрольної групи. Відносні величини показників функціонального стану серцево-судинної системи в дівчаток 8 років, які перехворіли на COVID-19, характеризувалися збільшенням ЧСС, систолічного та діастолічного тиску на 3,26, 1,16, 7,2% відповідно, у порівнянні з контролем. Відносні зміни, що характеризують пульсовий тиск, СОК та ХОК, характеризувалися зменшенням на 9,33, 9,49 і 5,27% відповідно, порівняно з контролем.

Дев'ятирічні дівчатка, що перехворіли на COVID-19, мали достовірні зміни в показниках ЧСС, діастолічного, пульсового тиску, СОК та ХОК у порівнянні з контрольними показниками. Варто звернути увагу на те, що ЧСС та діастолічний артеріальний тиск змінювались у бік збільшення, а показники пульсового тиску, СОК та ХОК у бік зменшення, у порівнянні з контролем. Відносні

Показники функціонального стану серцево-судинної системи в дівчаток, які перехворіли на COVID-19

Показники	Дівчатка, контрольна група			Дівчатка, які перехворіли на COVID-19		
	7 років n – 25	8 років n – 25	9 років n – 25	7 років n – 32	8 років n – 30	9 років n – 35
1. Частота серцевих скорочень, уд./хв	92,56 ± 3,10	93,50 ± 2,90	93,55 ± 2,30	95,35 ± 2,95	96,55 ± 2,65	97,25 ± 2,55
2. Систолічний арт. тиск, мм рт. ст.	97,50 ± 2,00	98,35 ± 2,15	100,45 ± 2,10	98,55 ± 2,25	99,50 ± 2,45	100,75 ± 2,35
3. Діастолічний арт. тиск, мм рт. ст.	60,75 ± 1,30	61,90 ± 1,45	62,30 ± 1,25	65,30 ± 1,25*	66,45 ± 1,45*	66,35 ± 1,60*
4. Пульсовий тиск, мм рт. ст.	36,75 ± 1,65	36,45 ± 1,80	38,15 ± 1,67	33,25 ± 1,75*	33,05 ± 1,95*	34,40 ± 1,97*
5. Систолічний об'єм крові, мл	44,32 ± 1,47	46,68 ± 1,62	50,50 ± 1,45	40,84 ± 1,5*	42,25 ± 1,70*	46,19 ± 1,78*
6. Хвилинний об'єм крові, мл	4 102,25 ± 137,39	4 306,45 ± 135,37	4 724,27 ± 116,15	3 894,09 ± 120,48*	4 079,23 ± 111,96*	4 491,97 ± 117,78*

Примітка: достовірні зміни щодо контрольної групи * > 5%.

величини, що характеризують ЧСС, систолічний і діастолічний тиск, були більші на 4, 0,3 та 6,5% відповідно, у порівнянні з контролем. Пульсовий тиск, СОК та ХОК мали загальну тенденцію до зменшення відносних показників на 9,82, 8,53, 4,91% відповідно, у порівнянні з контролем.

На основі отриманих нами даних зазначимо, що у хлопчиків, які перехворіли на COVID-19, зміни в показниках функціонування ССС мали односпрямований характер та вказували на генералізовану реакцію всіх складників ССС, але водночас є ймовірність більшого функціонального навантаження та, згодом, функціонального виснаження ССС. Максимальні зміни в показниках, які ми досліджували, спостерігались у 8-мирічних хлопчиків, можливо, це зумовлено проявом закону гетерохронності (Комісова та ін., 2021; Ждан та ін., 2022; Кумар та ін., 2023).

Наявність генералізованої функціональної реакції (з максимальними проявами у 8-мирічних хлопчиків) у хлопчиків, які перехворіли на COVID-19, у віддаленому часі може призвести до формування патологічних станів у діяльності ССС, обмеження функціональних резервів або нездатності формувати повноцінні адаптаційні реакції на подразники.

Стосовно дівчаток 7–9 років, які перехворіли на COVID-19, варто зазначити, що максимальне функціональне навантаження припадає на діяльність серця (систолічний артеріальний тиск, пульс, СОК), а перифе-

рійна частина ССС (діастолічний артеріальний тиск) не мала вираженого функціонального навантаження. Хоча максимальні зміни в показниках діяльності ССС дівчаток, як і у хлопчиків, були виявлені у віці 8 років. Організм дівчаток мав менш виражену адаптаційно-функціональну реакцію, ніж організм хлопчиків.

Отже, організм хлопчиків 7–9 років, які перехворіли на COVID-19, має більшу вірогідність формування функціональних патологічних станів у діяльності ССС.

Висновки

У результаті проведеного аналізу показників стану серцево-судинної системи у хлопчиків 7–9 років, які перехворіли на COVID-19, було зазначено тенденцію до збільшення майже всіх показників. Тільки у групі хлопчиків 7 років спостерігалось зменшення показників ЧСС, СОК та ХОК, які становили 2,4, 1,8, 3,7% відповідно.

Показники систолічного, діастолічного та пульсового тиску були більші, ніж у контрольній групі, і становили 8,0, 7,3, 8,5% відповідно. У групі хлопчиків 8-ми років, які перехворіли на COVID-19, спостерігається збільшення всіх показників у порівнянні із групою контролю, показники ЧСС, систолічного, діастолічного, пульсового тиску, СОК та ХОК становили 6,78, 10, 4,7, 18,6, 3,4, 10,4% відповідно. Зміни такого характеру були й у групі хлопчиків 9-ти років, показники ЧСС, систолічного, діастолічного, пульсового тиску, СОК та ХОК становили 4,8, 5,5, 2,37, 10,44, 2,26, 7,16% відповідно.

Отже, було виявлено, що найбільш виражені зміни характерні для групи хлопчиків 8-ми років.

У дівчаток 7–9 років, які переохворіли на COVID-19, показники стану серцево-судинної системи характеризувались різноспрямованими змінами, як у бік збільшення (ЧСС, артеріальний систолічний і діастолічний тиск), так і в бік зменшення (пульсовий тиск, СОК, ХОК). Так, для дівчаток 7-ми років характерне збільшення показників ЧСС та систолічного артеріального тиску на 3,01, 1,07%, зменшення показників діастолічного, пульсового тиску, СОК та ХОК на 7,33, 9,5, 7,9, 5,07% відповідно. Для дівчаток 8-ми років характерне збільшення показників

ЧСС, систолічного та діастолічного артеріального тиску на 3,26, 1,16, 7,2% та зменшення показників пульсового тиску, СОК та ХОК на 9,33, 9,49, 5,27% відповідно. Для дівчаток 9-ти років характерне збільшення показників ЧСС, систолічного та діастолічного артеріального тиску на 3,95, 0,29, 6,5% і зменшення показників пульсового тиску, СОК та ХОК на 9,82, 8,53, 4,91% відповідно.

Більш виражені зміни в показниках стану серцево-судинної системи характерні для хлопчиків 8-ми років, які переохворіли на COVID-19. Подібна закономірність спостерігалася й у дівчаток, але мала менш виражений характер і лише для параметрів, які характеризували діяльність серця.

Список використаної літератури

Василега П.А. Аналіз впливу COVID-19 на стан здоров'я та діяльність серцево-судинної системи дітей 7-9 років. *Актуальні проблеми сучасної медицини*. 2023. Том 23, № 2(82), С. 117–123. <https://doi.org/10.31718/2077-1096.23.2.2.117>.

Гельсінська декларація Всесвітньої медичної асоціації «Етичні принципи медичних досліджень за участю людини у якості об'єкта дослідження». Документ 990_005, редакція від 01.10.2008 [Електронний ресурс]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/990_005. (дата звернення: 18.06.2023).

Ждан В.М., Бабаніна М.Ю., Боряк Х.Р., Кир'ян О.А., Ткаченко М.В. Особливості патогенезу, перебігу і терапії пневмонії при COVID-19. *Актуальні проблеми сучасної медицини*. 2022. № 3-4 (79-80). Т.22. С. 220–225. <https://doi.org/10.31718/2077-1096.22.3.4.220>

Загальна декларація про біоетику та права людини. Організація Об'єднаних Націй з питань освіти, науки і культури: відділ етики науки і технології: сектор соціальних і гуманітарних наук [Електронний ресурс]. URL: <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001461/146180r.pdf>. (дата звернення: 18.06.2023).

Комісова Т.Є., Мамотенко А.В., Коваленко Л.П. та ін.. Вікова анатомія та фізіологія людини. Харків : ФОП Петров В.В., 2021. 112 с.

Кумар В., Аббас А.К., Астер Д.К. та ін. Основи патології за Роббінсоном і Кумаром: пер. 11-го англ. вид. / пер. з англ. І. Сорокіна, С. Гичка, І. Давиденко. Київ : ВСВ «Медицина», 2023. 856 с.

Маслюк В.Д., Раднюк Ю.О., Сирота Б.В., Баланюк І.В. Ураження серцево-судинної системи у хворих на COVID-19. *Медична наука України*. 2022. Том 18. №2. С. 45–54. <https://doi.org/10.32345/2664-4738.2.2022.07>.

Функціональні проби серцево-судинної системи в дитячій кардіології метод. Вказ. для студентів та лікарів-інтернів / упор. Г.С. Сенаторова, М.О. Гончарь, І.О. Саніна, О.А. Онікієнко, О.І. Страшок. Харків : ХНМУ, 2014. 32 с.

Bansal M. Cardiovascular disease and COVID-19. *Diabetes Metab Syndr*. 2020. Vol. 14, № 3. P. 247-250. <https://doi.org/10.1016/j.dsx.2020.03.013>.

Duan J., Wu Y., Liu C., Yang C., Yang L. Deleterious effects of viral pneumonia on cardiovascular system. *Eur Heart J*. 2020. Vol. 41, №19. P. 1833–1838. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehaa325>.

Khan M.S., Shahid I., Anker S.D., Solomon S.D., Vardeny O. et al. Cardiovascular implications of COVID-19 versus influenza infection: a review. *BMC Med*. 2020. Vol. 18, № 1. P. 403. <https://doi.org/10.1186/s12916-020-01816-2>.

Li W., Moore M.J., Vasilieva N., Sui J., Wong S.K. et al. Angiotensin-converting enzyme 2 is a functional receptor for the SARS coronavirus. *Nature*. 2003. Vol. 426, № 6965. P. 450–454. <https://doi.org/10.1038/nature02145>.

Lu R., Zhao X., Li J., et al. Genomic characterization and epidemiology of 2019 novel coronavirus: implications for virus origins and receptor binding. *Lancet*. 2020. №22. 565–574. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30251-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30251-8)

NICE: COVID-19 rapid guideline: managing the long-term effects of COVID-19. NICE guideline [Електронний ресурс] URL: <http://surl.li/mluwa> (дата звернення 05.03.2023)

Ogimi C., Englund J.A., Bradford M.C. et al. Characteristics and outcomes of coronavirus infection in children: the role of viral factors and an immunocompromised state. *Journal of the Pediatric Infectious Diseases Society*. 2019. Vol. 8, № 1. P. 21–28. <https://doi.org/10.1093/jpids/pix093>.

References (translated & transliterated)

Vasyleha, P.A. (2023). Analiz vplyvu COVID-19 na stan zdorovia ta diialnist sertsevo-sudynnoi systemy ditei 7–9 rokiv [Analysis of the impact of covid-19 on the state of health and activity of the cardiovascular system of children 7–9 years old] *Aktualni problemy suchasnoi medytsyny [Actual problems of modern medicine]*, 2, 117–123. <https://doi.org/10.31718/2077-1096.23.2.2.117> [in Ukrainian].

Helsinki deklaratsiia Vsesvitnoi medychnoi asotsiatsii «Etychni pryntsyipy medychnykh doslidzhen za uchastiu liudyny u yakosti obiekta doslidzhennia». (2008 October 1) [Declaration of Helsinki of the World Medical Association “Ethical principles of medical research with the participation of a person as an object of research.” Document 990_005, edition dated 10.01.2008]. [Electronic resource] URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/990_005 (access date 18.06.2023) [in Ukrainian].

Zhdan, V.M., Babanina, M.Iu., Boriak, Kh.R., Kyrian, O.A., & Tkachenko, M.V. (2022). Osoblyvosti patohenezu, perebihu i terapii pnevmonii pry COVID-19. [Features of the pathogenesis, course and therapy of pneumonia with COVID-19]. *Aktualni problemy suchasnoi medytsyny [Actual problems of modern medicine]*, 3-4, 220–225. <https://doi.org/10.31718/2077-1096.22.3.4.220> [in Ukrainian].

Zahalna deklaratsiia pro bioetyku ta prava liudyny. Orhanizatsiia Obiednanykh Natsii z pytan osvity, nauky i kultury: viddil etyky nauky i tekhnolohii: sektor sotsialnykh i humanitarnykh nauk [General Declaration on Bioethics and Human Rights. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization: Science and Technology Ethics Division: Social Sciences and Humanities Sector]. [Electronic resource] URL: <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001461/146180r.pdf> (access date 18.06.2023) [in Ukrainian].

Komisova, T.Ie., Mamotenko, A.V., & Kovalenko, L.P. (2021). Vikova anatomii ta fizioloheia liudyny [Age-related human anatomy and physiology]. Kharkiv : FOP Petrov V.V. [in Ukrainian].

Kumar, V., Abbas, A.K., & Aster, D.K. (2023). Osnovy patolohii za Robbinsonom i Kumarom: per. 11-ho anhl. vyd. [Robbins & Kumar Basic pathology]. Kyiv : VSV «Medytsyna» [in Ukrainian].

Masliuk, V.D., Radniuk, Yu.O., Syrota, B.V., & Balaniuk, I.V. (2022). Urazhennia sertsevo-sudynnoi systemy u khvorykh na COVID-19 [Damage to the cardiovascular system in patients with COVID-19]. *Medychna nauka Ukrainy [Medical science of Ukraine]*, 2, 45–54. <https://doi.org/10.32345/2664-4738.2.2022.07> [in Ukrainian].

Senatorova, H.S. Honchar, M.O., Sanina, I.O., Onikienko, O.L., & Strashok O.I. (2014). Funktsionalni proby sertsevo-sudynnoi systemy v dytiachii kardioloheii metod. Vkaz. Dlia studentiv ta likariv-interniv [Functional tests of the cardiovascular system in pediatric cardiology method]. Kharkiv : KhNMU [in Ukrainian].

Bansal, M. (2020). Cardiovascular disease and COVID-19. *Diabetes Metab Syndr*. 3, 247-250. <https://doi.org/10.1016/j.dsx.2020.03.013> [in English].

Duan, J., Wu Y., Liu, C., Yang, C., & Yang, L. (2020). Deleterious effects of viral pneumonia on cardiovascular system. *Eur Heart J*. 19, 1833-1838. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehaa325> [in English].

Khan, M.S., Shahid, I., Anker, S.D., Solomon, S.D., Vardeny, O., et al. (2020). Cardiovascular implications of COVID-19 versus influenza infection: a review. *BMC Med*. 1, 403. <https://doi.org/10.1186/s12916-020-01816-2> [in English].

Li, W., Moore, M.J., Vasileva, N., Sui, J., & Wong, S.K., et al. (2003). Angiotensin-converting enzyme 2 is a functional receptor for the SARS coronavirus. *Nature*. 6965, 450-454. <https://doi.org/10.1038/nature02145> [in English].

Lu, R., Zhao, X., & Li, J., (2020). Genomic characterization and epidemiology of 2019 novel coronavirus: implications for virus origins and receptor binding. *Lancet*. 22, 565-574. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30251-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30251-8) [in English].

NICE: COVID-19 rapid guideline: managing the long-term effects of COVID-19. NICE guideline. [Electronic resource] URL: <http://surl.li/mluwa> (access date 05.03.2023) [in English].

Ogimi, C., Englund, J.A., & Bradford, M.C. (2019). Characteristics and outcomes of coronavirus infection in children: the role of viral factors and an immunocompromised state. *Journal of the Pediatric Infectious Diseases Society*. 1, 21–28. <https://doi.org/10.1093/jpids/pix093> [in English].

Отримано: 22.06.2023

Прийнято: 18.10.2023



УДК [639.311.053.1:574.5]:591.524.12(477)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.4>

ХАРАКТЕРИСТИКА ЗООПЛАНКТОНУ РИБОГОСПОДАРСЬКИХ ВОДОЙМ ЛЬВІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Т. В. Григоренко¹, А. В. Самчишина², А. М. Базаєва³, С. А. Коба⁴

У статті представлено моніторингові дослідження щодо якісного складу та кількісного розвитку зоопланктону в рибницьких ставах Львівської області. Установлено, що зоопланктон досліджених водойм був представлений 61 таксоном. Основу видового складу становили коловертки 27 видів (або 44,3% від загальної кількості виявлених видів), 22 види (або 36,0%) гіллястовусих і 12 (або 19,7%) веслоногих ракоподібних. У складі кладоцер зазначено 14 родів із 6 родин, копепод – 10 родів із 3 родин, коловертки були представлені 15 родами з 11 родин. Тобто в загальному видовому списку зоопланктону за фауністичним спектром угруповань переважали представники ротіферно-кладоцерного комплексу.

Найбільш різноманітними з гіллястовусих ракоподібних були родини *Daphniidae* і *Chydoridae*, серед веслоногих – родина *Cyclopidae*, серед коловерток – родина *Branchionidae*.

У рибницьких ставах ФГ «Корон» відмічено представника гіллястовусих ракоподібних – *Diaphanosoma dibia* (Манишова, 1964), а у ставах господарств ТзОВ «Карпатський водограй» і ДП «ДГ ЛДС ІРГ НААН» виявлено інвазійний вид веслоногих ракоподібних – *Sinodiaptomus sarsi* (Rylov, 1923).

Серед виявлених видів зоопланктону у ставах різних господарств кількість видів індикаторів сапробності сягала 81,3–93,3%. Основну частку видів-індикаторів сапробності зоопланктону

¹ кандидат сільськогосподарських наук,
завідувачка лабораторії гідробіології та технологій культивування цінних безхребетних
(Інститут рибного господарства Національної академії аграрних наук України, м. Київ)
e-mail: grygorenko-@ukr.net
ORCID: 0000-0002-8769-1443

² кандидат біологічних наук,
провідний науковий співробітник лабораторії гідробіології та технологій культивування цінних
безхребетних
(Інститут рибного господарства Національної академії аграрних наук України, м. Київ)
e-mail: larysa.samchyshyna@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3816-2641

³ науковий співробітник лабораторії гідробіології та технологій культивування цінних безхребетних
(Інститут рибного господарства Національної академії аграрних наук України, м. Київ)
e-mail: a_bazaeva@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0509-1349

⁴ старший науковий співробітник лабораторії кормів і годівлі риб
(Інститут рибного господарства Національної академії аграрних наук України, м. Київ)
e-mail: koba_sveta@i.ua
ORCID: 0000-0001-8448-5372

різних рибницьких ставів формували β - (28,1–38,2%) та α - β -мезосапроби (26,5–35,7%), що характерно для вод із помірним рівнем органічного забруднення.

Кількісний розвиток зоопланктону вирицувальних ставів характеризувався оптимальними $2,94 \pm 0,98$ – $6,88 \pm 4,20$ г/м³ (ФГ «Короп», ДП ДГ «ЛДС ІРГ НААН») і високими $14,68 \pm 7,09$ – $38,61 \pm 17,60$ г/м³ (ТзОВ «Карпатський водограй») показниками. У більшості вирицувальних ставів біомаса формувалася завдяки розвитку цінних у кормовому значенні гіллястовусих ракоподібних (від 44,3 до 91,8%). У нагульних ставах рівень розвитку зоопланктону був низький, середньосезонні біомаси не перевищували $1,06 \pm 0,65$ – $3,84 \pm 0,68$ г/м³, що вказує на активне споживання його наявною іхтіофауною водоїм.

Упродовж вегетаційного сезону в рибницьких ставах створювалося від 222,6 до 7722,0 кг/га продукції зоопланктону, що, у свою чергу, може забезпечити потенційну рибопродуктивність завдяки споживанню зоопланктону на рівні від 16,0 до 552,0 кг/га.

Ключові слова: рибницькі стави, зоопланктон, якісний склад, видове різноманіття, види-індикатори сапробності, кількісний розвиток.

CHARACTERISTICS OF ZOOPLANKTON OF FISHERIES WATERS OF LVIV REGION

T. V. Hryhorenko, L. V. Samchyshyna, A. M. Bazaieva, S. A. Koba

The article present monitoring studies on the qualitative composition and quantitative development of zooplankton in the fish ponds of the Lviv region. It was found that the zooplankton in the studied water bodies consisted of 61 taxa. The species composition was predominantly represented by rotifers with 27 species (or 44,3% of the total identified species), cladocerans with 22 species (or 36,0%) and 12 (or 19,7%) species of copepod crustaceans. Among cladocerans, 14 genera from 6 families were noted, copepods – 10 genera from 3 families, rotifers were represented by 15 genera from 11 families. Thus, the zooplankton mainly consists of the rotifer-cladoceran spectrum of species.

The most diverse families between cladocerans were Daphniidae and Chydoridae, between copepods is Cyclopidae, and between rotifers is Branchionidae family.

The cladoceran species, *Diaphanosoma dubia* Manuilova, 1964, was found in fishing ponds of “Korop” company, and an invasive species of copepod crustaceans – *Sinodiaptomus sarsi* (Rylov, 1923) was found in the ponds of Karpatsky Vodogray LLC and SE “DG LDS IRG NAAN”.

Among the identified species of zooplankton in ponds from different farms, the number of saprobic indicator species ranged from 81,3 to 93,3%. The majority of saprobic indicator species in the zooplankton of different fish ponds were represented by β - (28,1–38,2%) and α - β -mesosaprobic species (26,5–35,7%), which is characteristic of water with a moderate level of organic pollution.

The quantitative development of zooplankton in breeding pond was characterized by optimal $2,94 \pm 0,98$ – $6,88 \pm 4,20$ г/м³ (FG “Korop”, SE “DG LDS IRG NAAS”) and high $14,68 \pm 7,09$ – $38,61 \pm 17,60$ г/м³ (TzOV “Karpatsky Vodogray”) levels.

In most breeding ponds, the valuable for fish larvae natural feeding cladoceran species were contributed into biomass from 44,3 to 91,8%. In the fattening ponds, the zooplankton development was low and the average seasonal biomass was up to $1,06 \pm 0,65$ – $3,84 \pm 0,68$ г/м³. This may be explained by active consumption of zooplankton by fishes.

The production of zooplankton was from 222,6 to 7 722,0 kg/ha during the growing season in fish ponds that can ensure potentially the fish productivity from 16,0 to 552,0 kg/ha.

Key words: fish ponds, zooplankton, qualitative composition, species diversity, saprobity indicator species, quantitative development.

Вступ

Зоопланктон є важливою складовою частиною водних екосистем, що виконує низку важливих функцій. Особливо велике значення зоопланктонні організми мають для малопроточних водойм, а саме водосховищ, озер і ставів. Завдяки фільтраційному способу живлення більшості зоопланктерів відбуваються процеси біологічного

самоочищення, трансформації та колообігу органічної речовини й енергії у водоймах. Зоопланктон є важливою ланкою у трофічному ланцюзі гідробіонтів, споживанням фіто-, бактеріопланктону і детриту створює вторинну продукцію та передає на наступні трофічні рівні (Кражан і Хижняк, 2014; Czerniawski & Domagal, 2013). Тому різкі порушення структури та функціонування

зоопланктонних угруповань можуть призводити до зміни інших компонентів екосистеми.

З огляду на велике значення планктонних тварин у водних біоценозах, постає необхідність детального вивчення розвитку зоопланктонних угруповань і в умовах рибогосподарських водойм. Для рибницьких ставів зоопланктонні організми безпосередньо є важливим кормовим ресурсом як для молоді, так і для старших вікових груп риб.

Зазвичай під час проведення рибницьких досліджень більше уваги приділяється кількісним показникам розвитку тваринного планктону – чисельності та біомасі, і дещо менше уваги приділяється якісному складу (Олешко та ін., 2016; Пукало та ін., 2020; Gryhorenko et al., 2021; Куць, 2021). Відомо, що видове розмаїття та кількісний розвиток зоопланктону залежать від багатьох абіотичних і біотичних чинників середовища. Останнім часом у зв'язку зі змінами кліматичних умов і підвищеним антропогенним навантаженням на водні екосистеми спостерігаються й істотні зміни якісних і кількісних показників гідробіологічних угруповань, що формують природні кормові ресурси водойм (Bugian, 2017; Pearson & Duggan, 2018; Романенко та ін., 2019; Dexter & Bollens, 2020). У цьому контексті значний інтерес становить детальне вивчення видового складу та кількісного розвитку зоопланктонних організмів у рибницьких ставах.

Метою роботи було вивчення якісного складу та кількісного розвитку зоопланктону рибогосподарських водойм Львівської області. Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- установити видове розмаїття зоопланктону рибницьких ставів;
- проаналізувати кількісні показники розвитку зоопланктону в нагульних і вирощувальних ставах;
- надати сапробіологічну характеристику середовища вирощування риби за показниками зоопланктону;
- оцінити продуктивність рибогосподарських водойм за рівнем розвитку зоопланктону як компоненту природної кормової бази для риб.

Матеріал і методи

Натурні дослідження проводилися на базі трьох господарств, а саме: на Державному підприємстві «Дослідне господарство Львівської дослідної станції Інституту рибного господарства НААН», що розташоване

в с. Великий Любін, у ТзОВ «Карпатський водограй» (с. Пустомити) та фермерському господарстві ФГ «Короп» (с.мт Рава-Руська Львівської області).

Рибницькі стави ДП ДГ Львівської дослідної станції Інституту рибного господарства (далі – ДП «ДГ ЛДС ІРГ НААН») розташовані в долині річки Верещиця (ліва притока Дністра). Джерелом водопостачання господарства ТзОВ «Карпатський водограй» є річка Ставчанка (басейн Дністра), а ФГ «Короп» – річка Рата (ліва притока Західного Бугу).

Температура води у ставах упродовж періоду дослідження змінювалась у межах 16–28 °С, з максимальними показниками в липні та серпні.

У вирощувальних ставах за однакової густоти посадки вирощувався рибопосадковий матеріал коропа в монокультурі, а в нагульних – товарний короп у полікультурі з рослиноїдними рибами.

Якісний склад і кількісний розвиток тваринного планктону вивчали впродовж вегетаційного сезону (травень – вересень) 2021 р. в 5-ти нагульних і 7-ми вирощувальних ставах, площею від 0,12 до 58,0 га, середньою глибиною 1,0–1,50 м. Зоопланктонні проби відбирали раз на місяць. Відбір, фіксація й опрацювання матеріалу проводилися згідно із загально визначеними гідробіологічними методиками (Методи ..., 2006). Для ідентифікації видового складу зоопланктону використовували визначники (Rudescu, 1960; Монченко, 1974; Kiefer, 1978; Voxshall & Defaye, 2009; Kotov et. al, 2014; Bledzki & Rybak, 2016).

Подібність видового складу зоопланктону визначали за індексом Соренсена (K_s) (Sorensen, 1948):

$$K_s = \frac{2 N_{A+B}}{(N_A + N_B)},$$

де N_{A+B} – кількість спільних видів у водоймах А і В; N_A і N_B – кількість видів відповідно у водоймі А і В. Коефіцієнт видової подібності змінюється від 0 (повна відмінність) до 1. За умови $K_s > 0,5$ видове різноманіття двох водойм схоже, а якщо $K_s < 0,5$, воно істотно відрізняється.

Сапробіологічна характеристика водного середовища надана на основі наявності видів-індикаторів сапробності (Методи ..., 2006).

Усього за період досліджень було відібрано, опрацьовано та проаналізовано 65 зоопланктонних проб.

Результати та обговорення

У результаті проведених досліджень установлено, що зоопланктон рибницьких ставів був представлений трьома основними групами організмів: Rotifera, Cladocera, Сорерода. Загалом у досліджених водоймах різних господарств Львівської області було ідентифіковано 61 таксон зоопланктонних організмів, з яких 27 видів (або 44,3% від загальної кількості виявлених видів) коловерток, 22 види (або 36,0%) гіллястовусих і 12 (або 19,7%) веслоногих ракоподібних (табл. 1). Серед інших організмів у зоопланктонних пробах були відмічені статобласти моховаток (Bryozoa), черепашкові рачки (*Ostracoda sp.*), личинки хіро-

номід (*Chironomidae larvae*), одноденок (*Ephemeroptera larvae*) і волохокрильців (*Trichoptera larvae*).

У складі кладоцер зазначено 14 родів із 6 родин, копепод – 10 родів із 3 родин, коловертки були представлені 15 родами з 11 родин.

Найбільш різноманітними з гіллястовусих ракоподібних були родини Daphniidae і Chydoridae – відповідно 9 і 7 видів, серед веслоногих родина Cyclopidae – 8 видів, серед коловерток родина Branchionidae – 13 видів (див. табл. 1).

Видове різноманіття зоопланктонних організмів рибницьких ставів у межах господарств було незначним, реєстрували від

Таблиця 1

Видовий склад зоопланктону рибницьких ставів Львівської області, 2021 р.

№	Види	Господарства			Показник сапробності
		ДП «ДГ ЛДС ІРГ НААН»	ТзОВ «Карпатський водограй»	ФГ «Короп»	
1	2	3	4	5	6
	ROTIFERA				
1.	<i>Asplanchna priodonta</i> Gosse, 1850 p.	+	+	+	о-β
2.	<i>Asplanchnopus hyalinus</i> Hanning, 1913 p.			+	
3.	<i>Brachionus angularis</i> Gosse, 1851 p.	+	+	+	β-α
4.	<i>Br. beninni</i> Leissling, 1924 p.			+	β
5.	<i>Br. budapestinensis</i> Daday, 1885 p.			+	β
6.	<i>Br. calyciflorus</i> Pallas, 1766 p.	+		+	β-α
7.	<i>Br. diversicornis</i> Daday, 1883 p.	+	+	+	β
8.	<i>Br. falcatus</i> Zacharias, 1898 p.	+	+	+	β
9.	<i>Br. quadridentatus</i> Hermann, 1783 p.	+		+	β
10.	<i>Br. urceus</i> Linnaeus, 1758 p.		+		β
11.	<i>Keratella cochlearis</i> Gosse, 1851 p.	+		+	о-β
12.	<i>Keratella quadrata</i> Müller, 1786 p.	+	+	+	о-β
13.	<i>Notholca squamula</i> Muller, 1786 p.		+		о-β
14.	<i>Platyias patulus</i> Muller, 1786 p.			+	β
15.	<i>Platyias quadricornis</i> Ehrenberg, 1832 p.			+	β
16.	<i>Epiphanes brachionus</i> Ehrenberg, 1837 p.	+			β
17.	<i>Euchlanus dilatata</i> Ehrenberg, 1832 p.	+		+	о-β
18.	<i>Filinia longiseta</i> Ehrenberg, 1834 p.	+	+	+	β
19.	<i>Hexarthra mira</i> Hudson, 1871 p.			+	β
20.	<i>Lecane luna</i> Müller, 1776 p.	+		+	о-β
21.	<i>Lecane cornuta</i> Müller, 1786 p.			+	о-β
22.	<i>Lindia torulosa</i> Dujardin, 1841 p.			+	о
23.	<i>Mytilina ventralis</i> Ehrenberg, 1832 p.	+		+	о
24.	<i>Polyarthra vulgaris</i> Carlin, 1943 p.	+		+	β
25.	<i>Synchaeta stylata</i> Wierzejski, 1893 p.			+	о
26.	<i>Trichocerca longiseta</i> Schrank, 1802 p.	+		+	о
27.	<i>Trichocerca pusilla</i> Jennings, 1903 p.			+	о

Продовження Таблиці 1

	CLADOCERA				
28.	<i>Alona quadrangularis</i> Muller, 1785 p.	+	+		о-β
29.	<i>Alona affinis</i> Leydig, 1860 p.			+	о
30.	<i>Chydorus ovalis</i> Kurz, 1875 p.			+	о
31.	<i>Chydorus sphaericus</i> Muller, 1776 p.	+	+		β
32.	<i>Peracantha truncata</i> Muller, 1785 p.		+		о
33.	<i>Pleuroxus striatus</i> Schodler, 1862 p.		+		о-β
34.	<i>Pleuroxus aduncus</i> Jurine, 1820 p.	+			о
35.	<i>Bosmina longirostris</i> Muller, 1785 p.	+	+	+	о-β
36.	<i>Ceriodaphnia affinis</i> Lillijerborg, 1900 p.	+		+	о-β
37.	<i>Ceriodaphnia quadrangula</i> Muller, 1785 p.		+		о
38.	<i>Daphnia longispina</i> Muller, 1785 p.	+	+	+	β
39.	<i>Daphnia magna</i> Straus, 1820 p.			+	а-р
40.	<i>Moina rectirostris</i> Leydig, 1860 p.	+			а-р
41.	<i>Moina micrura</i> Kurz, 1875 p.		+	+	β
42.	<i>Scapholeberis microcephala</i> Lilljeborg, 1900 p.		+		о
43.	<i>Scapholeberis mucronata</i> Muller, 1776 p.	+	+		β
44.	<i>Simocephalus vetulus</i> Muller, 1776 p.	+	+		о-β
45.	<i>Sida crystallina</i> Muller, 1776 p.		+	+	о
46.	<i>Diaphanosoma brachyurum</i> Lievin, 1848 p.	+	+		о
47.	<i>Diaphanosoma dubia</i> Manuilova, 1964 p.			+	
48.	<i>Polyphemus pediculus</i> Linne, 1778 p.		+		о
49.	<i>Leptodora kindtii</i> Focke, 1844 p.	+	+	+	о-β
50.	COPEPODA <i>Acanthocyclops robustus</i> Sars, 1863 p.		+	+	
51.	<i>Acanthocyclops trajani</i> Mirabdullayev & Defaye, 2004 p.	+			
52.	<i>Cyclops furcifer</i> Claus, 1857 p.	+			о
53.	<i>Diacyclops bicusoidatus</i> Claus, 1857 p.		+		
54.	<i>Eucyclops serrulatus</i> Fischer, 1851 p.		+	+	β
55.	<i>Ectocyclops phaleratus</i> Koch, 1838 p.		+		о-β
56.	<i>Mesocyclops leuckarti</i> Claus, 1857 p.		+	+	о
57.	<i>Thermocyclops crassus</i> Fischer, 1853 p.		+		
58.	<i>Thermocyclops oithonoides</i> Sars, 1863 p.	+			о
59.	<i>Eurytemora velox</i> Lilljeborg, 1853 p.		+		
60.	<i>Eudiatomus transylvanicus</i> Daday, 1890 p.		+		
61.	<i>Sinodiaptomus sarsi</i> Rylov, 1923 p.	+	+		
Усього		30	32	37	52

30 до 37 видів. Більшим видовим різноманіттям характеризувалися стави господарств ТзОВ «Карпатський водограй» і ФГ «Короп» (див. табл. 1). Ключове положення в таксономічному спектрі (співвідношенні основних таксономічних груп за кількістю видів) зоопланктону в рибницьких ставах ДП «ДГ ЛДС ІРГ НААН» і ФГ «Короп» належало коловерткам та гіллястовусим ракоподібним, а в ТзОВ «Карпатський водограй» – гіллястовусим і веслоногим ракоподібним. Тобто видовий спектр зоопланктону більшості водойм мав ротіферно-клядоцерний характер (рис. 1).

Зауважимо, що в рибницьких ставах господарств ТзОВ «Карпатський водограй» і ДП «ДГ ЛДС ІРГ НААН» виявлено вид каланоїдних копепод – *Sinodiaptomus sarsi* (Rylov, 1923), природний ареал якого покриває Центрально-Східну Азію. Віднедавна даний вид набуває все більшого поширення в Європі. У світі він вважається інвазійним, його також виявлено у водоймах Ірану, Нової Зеландії та Каліфорнії (Gunduz, 1998; Batters et al., 2020).

В Україні вперше було ідентифіковано у 2014 р. у водоймах верхів'я річки Уж (Микітчак, 2018-А, 2018-Б), а у 2020 р. був

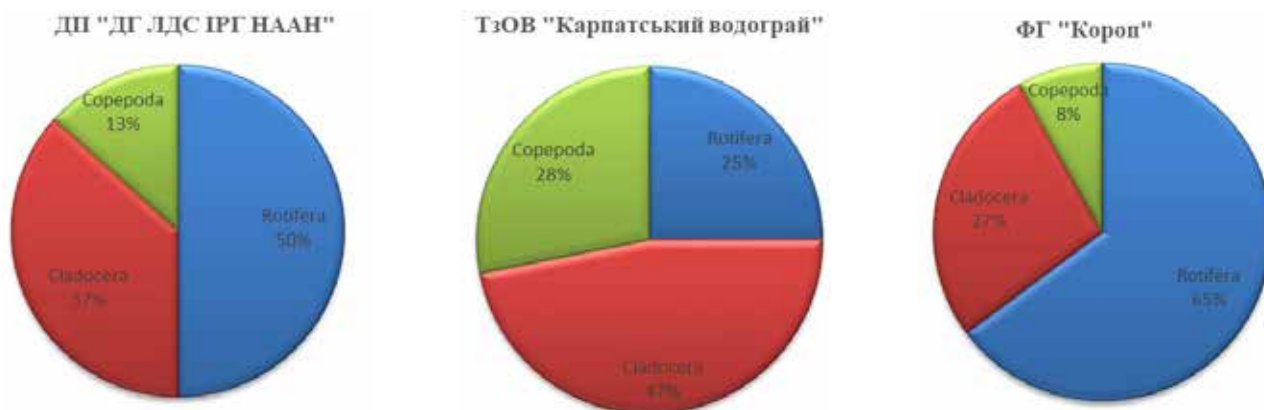


Рис. 1. Співвідношення основних таксономічних груп зоопланктону за кількістю видів

знайдений в озерах парку Нивки (м. Київ) (Svetlichny & Samchyshyna, 2021).

У рибницьких ставах ФГ «Короп» спостережено представника гіллястовусих ракоподібних – *Diaphanosoma dubia (dubium)* (Manuilova, 1964), теж вихідця зі Східної Азії (Громова та ін., 2018).

Видовий склад зоопланктону нагульних і вирощувальних ставів у межах господарства суттєво не відрізнявся, коефіцієнти видової подібності за Соренсеном були високими ($K_s = 0,60-0,79$), що, імовірно, пов'язано з однаковими екологічними умовами формування їх видового складу і, зокрема, спільним джерелом водопостачання ставів. Проте дещо відмінним був видовий склад зоопланктону між рибницькими ставами господарства ТзОВ «Карпатський водограй» і ДП «ДГ ЛДС ІРГ НААН», ТзОВ «Карпатський водограй» і ФГ «Короп» ($K_s = 0,41-0,48$) (табл. 2).

Спільними видами, які траплялися у ставах усіх господарств, серед коловерток були такі: *Asplanchna priodonta*, *Brachionus angularis*, *Br. diversicornis*, *Br. falcatus*, *Filinia longiseta*, *Keratella quadrata*; серед гіллястовусих – *Daphnia longispina*, *Bosmina longirostris*, *Leptodora kindtii* (див. табл. 1). У всіх пробах рибогосподарських водойм відмічено наупліальні та копеподитні стадії розвитку веслоногих ракоподібних.

Серед виявлених видів зоопланктону в рибницьких ставах різних господарств реєстрували від 26 до 34 (або 81,3–93,3% від загальної кількості) видів індикаторів сапробності. Більшість виявлених видів-індикаторів сапробності належали до групи β -мезосапробів (28,1–38,2%), о- β -мезосапробів (26,5–35,7%) та о-мезосапробів (21,4–26,9%), що характерно для вод з помірним рівнем органічного забруднення. Кількість представників β - α , α - β -мезосапробіонтів і α -р-сапробіонтів не перевищувала 2,9–7,1% від загальної кількості виявлених видів-індикаторів (див. табл. 1). Основну частку видів-індикаторів сапробності зоопланктону в рибницьких ставах ДП «ДГ ЛДС ІРГ НААН» формували о- β -мезосапроби (35,7%), у ставах ТзОВ «Карпатський водограй» – у рівних кількостях β -мезосапроби (28,1%) і о- β -мезосапроби (28,1%), а у ФГ «Короп» – β -мезосапроби (38,1%). Отже, досліджені рибогосподарські водойми даних господарств можна схарактеризувати як помірно забруднені.

Щодо кількісного розвитку тваринного планктону, то середні за вегетаційний сезон показники чисельності в нагульних ставах різних господарств перебували в межах від 47,13 до 141,0 тис. екз./м³, а біомаси – від 1,06 до 3,84 г/м³. Тобто обстежені нагульні стави мали низький рівень розвитку

Таблиця 2
Подібність видового складу зоопланктону рибницьких ставів різних господарств (за коефіцієнтом Соренсена)

Господарства	ДП «ДГ ЛДС ІРГ НААН»	ТзОВ «Карпатський водограй»	ФГ «Короп»
ДП «ДГ ЛДС ІРГ НААН»	–	0,48	0,54
ТзОВ «Карпатський водограй»		–	0,41
ФГ «Короп»			–

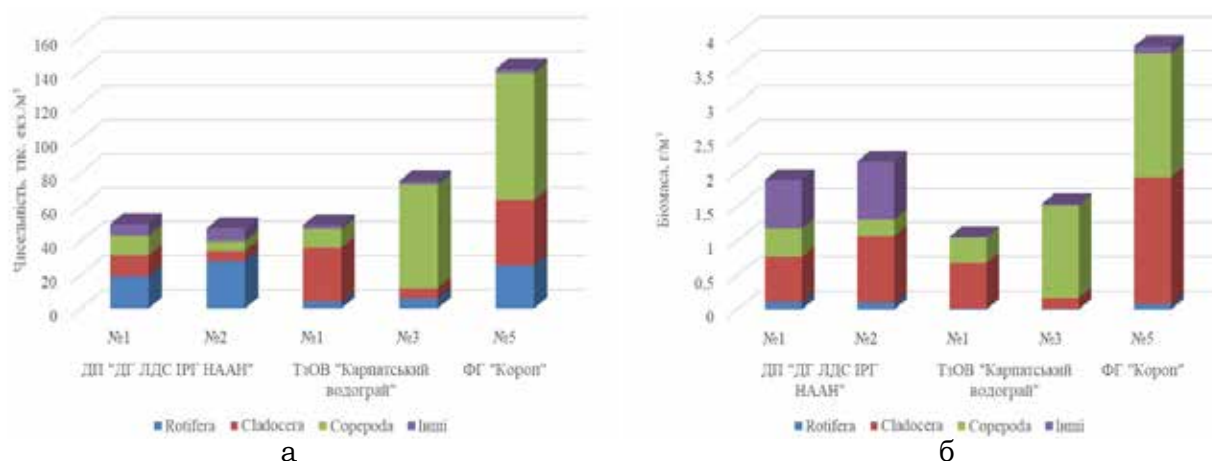


Рис. 2. Середньосезонні показники чисельності (а) та біомаси (б) зоопланктону в нагульних ставах різних рибницьких господарств Львівської області

зоопланктону, що вказує на активне споживання його наявною іхтіофауною водойм (рис. 2).

Так, у ставах ДІП «ДГ ЛДС ІРТ НААН» максимальні показники розвитку зоопланктону були на початку вегетаційного сезону (до 74,0–110,0 тис. екз./м³ чисельності та до 3,35–6,16 г/м³ біомаси), з ростом риби й активним виїданням нею природного корму показники значно знижувались. Середньосезонна чисельність зоопланктону в даних ставах не перевищувала 47,12 ± 23,8–49,75 ± 13,05 тис. екз./м³, а біомаса – 1,89 ± 0,80–2,16 ± 0,37 г/м³. Характерним для обох ставів був масовий розвиток коловерток, частка яких у ставі № 1 сягала 37,7%, а у ставі № 2 – 59,4% загальної чисельності зоопланктону. Натомість біомаси формувалися завдяки розвитку гіллястовусих (34,4–45,0%) ракоподібних і групи інших організмів (37,6–39,7%) (див. рис. 2).

Основними видами, що відігравали роль у формуванні кількісних показників, серед коловерток були: *Asplanchna priodonta*, *Brachionus calyciflorus*; серед гіллястовусих – *Moina rectirostris*, *Chydorus sphaericus*.

У нагульних ставах ТЗОВ «Карпатський водограй» кількісний розвиток зоопланктону змінювався в межах від 3,6 до 177,0 тис. екз./м³ за чисельністю та від 0,16 до 3,56 г/м³ за біомасою. Вищі показники в обох ставах були в кінці вегетаційного сезону, завдяки розвитку гіллястовусих (*Pleuroxus striatus*, *Scapholeberis microcephala*, *Chydorus sphaericus*, *Alona quadrangularis*) і веслоногих (*Sinodiaptomus sarsi*, *Thermocyclops crassus*) ракоподібних. Середні за вегетаційний сезон показники чисельності в цих ставах були на рівні 48,90 ± 29,0–74,98 ±

37,15 тис. екз./м³, а біомаси – 1,06 ± 0,65–1,54 ± 0,75 г/м³. У нагульному ставі № 1 основу як чисельності (64,8%), так і біомаси (62,3%) формували дрібні форми гіллястовусих ракоподібних, а у ставі № 3 чисельність і біомаса відповідно на 81,2 і 87,9% формувалися завдяки розвитку веслоногих ракоподібних (див. рис. 2).

У нагульному ставі № 4 ФГ «Короп» загальна чисельність зоопланктону впродовж вегетаційного сезону перебувала в межах 68,0–204,0 тис. екз./м³, а біомаса – 2,33–6,18 г/м³, у середньому – відповідно 141,0 ± 26,9 тис. екз./м³ і 3,84 ± 0,68 г/м³ (див. рис. 2). Основу чисельності зоопланктону формували веслоногі (53,2%), завдяки розвитку *Mesocyclops leuckart*, *Eucyclops serrulatus* і їхніх наупліальних і копеподітних стадій розвитку, а біомаси – гіллястовусі (48,2%) ракоподібні, завдяки розвитку *Daphnia longispina*, *Bosmina longirostris*, *Ceriodaphnia affinis*.

Кількісний розвиток зоопланктону вирощувальних ставів характеризувався оптимальними 2,94–6,88 г/м³ (ДІП «ДГ ЛДС ІРТ НААН», ФГ «Короп») і високими 14,68–38,61 г/м³ (ТЗОВ «Карпатський водограй») показниками (рис. 3), що вказує на забезпеченість молоді риби природними кормами під час її вирощування.

Для динаміки розвитку зоопланктону вирощувальних ставів було характерно 1–2 максимуми, зазвичай на початку й у другій половині вегетаційного сезону.

У вирощувальному ставі № 34 ДІП «ДГ ЛДС ІРТ НААН» кількісні показники розвитку зоопланктону впродовж вегетаційного сезону змінювалися в межах від 13,0 до 1 918,0 тис. екз./м³ за чисельністю та від

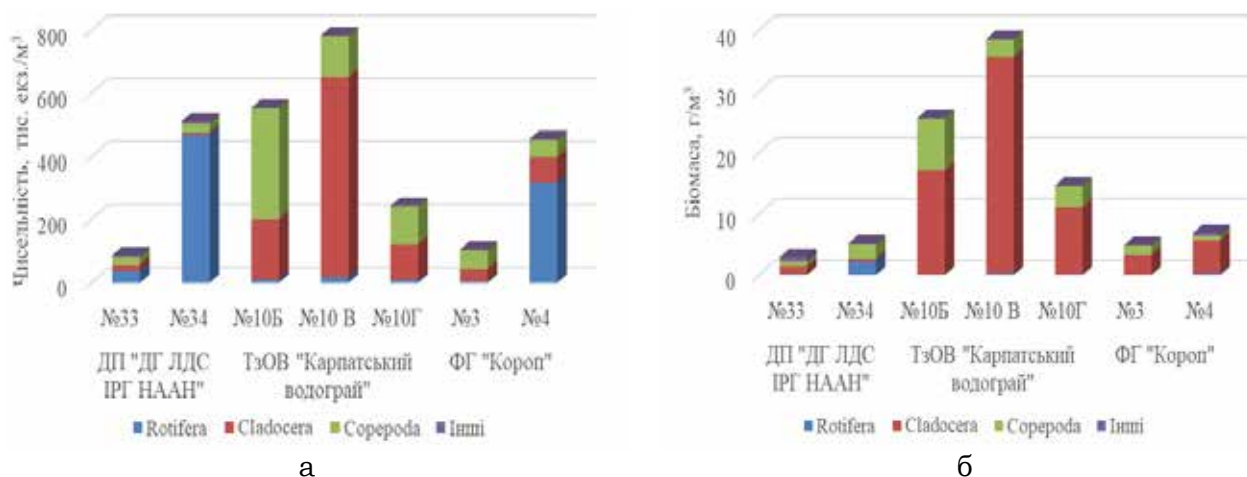


Рис. 3. Середньосезонні показники чисельності (а) та біомаси (б) зоопланктону у вирощувальних ставах різних рибницьких господарств Львівської області

0,33 до 11,06 г/м³ за біомасою. Максимальні показники чисельності (1 918,0 тис. екз./м³) і біомаси (11,06 г/м³) спостерігали на початку періоду дослідження (у червні), в основному завдяки масовому розвитку коловертток: *Asplanchna priodonta*, *Brachionus calyciflorus*, *Br. diversicornis*, надалі, аж до кінця вегетаційного сезону, перевага розвитку як за чисельністю, так і за біомасою належала веслоногим ракоподібним, завдяки розвитку таких видів: *Thermocyclops oithonoides*, *Acanthocyclops trajani*, *Cyclops furcifer*. Середні за період дослідження показники чисельності та біомаси в даному ставі були на рівні 512,0 ± 269,0 тис. екз./м³ і 5,21 ± 2,40 г/м³ відповідно. Основу чисельності (91,5%) формували коловертки, а біомаси – у рівних кількостях коловертки (44,6%) і веслоногі (44,6%) ракоподібні (див. рис. 3).

У вирощувальному ставі № 33 кількісний розвиток тваринного планктону, порівняно зі ставом № 34, був нижчим. Так, чисельність упродовж вегетаційного сезону змінювалася в межах 22,0–178,0 тис. екз./м³, а біомаса – 0,25–4,61 г/м³. У червні чисельність зоопланктону на 67,4% формувалася завдяки розвитку коловертток (види роду *Brachionus*), а біомаса – на 49,5%, завдяки розвитку гіллястовусих ракоподібних (*Chydorus sphaericus*, *Moina rectirostris*). Найвищою біомаса зоопланктону була в липні та формувалась розвитком гіллястовусих (до 67,0%) ракоподібних. У середньому за період дослідження чисельність у даному ставі становила 86,62 ± 33,0 тис. екз./м³, а біомаса – 2,94 ± 0,98 г/м³. Відповідно до середньосезонних показників, основу чисельності становили коловертки

(41,8%) і веслоногі (29,3%) ракоподібні, а біомаси – гіллястовусі (44,3%) і веслоногі (29,1%) ракоподібні (див. рис. 3).

У вирощувальних ставах ТзОВ «Карпатський водограй» кількісний розвиток зоопланктону змінювався в межах від 95,0 до 1376,0 тис. екз./м³ за чисельністю та від 1,55 до 93,03 г/м³ за біомасою. У вирощувальних ставах № № 10Б, 10В упродовж усього періоду дослідження розвиток тваринного планктону характеризувався вищими показниками, порівняно зі ставом № 10Г. Максимальні показники розвитку зоопланктону в усіх ставах були в червні, коли біомаси сягали 37,07–93,03 г/м³, завдяки розвитку гіллястовусих ракоподібних. Друге підвищення в динаміці розвитку зоопланктону, але вже зі значно нижчими показниками біомаси (до 9,17–21,22 г/м³), відмічали на початку вересня, завдяки розвитку дрібних форм гіллястовусих і веслоногих ракоподібних. У середньому за період дослідження показники чисельності зоопланктону були на рівні 243,67 ± 36,83–783,67 ± 58,7 тис. екз./м³ і 14,68 ± 7,09–38,61 ± 17,60 г/м³ за біомасою. У ставі № 10-В основу як чисельності (81,0%), так і біомаси (92,0%) формували гіллястовусі ракоподібні, в основному завдяки розвитку *Bosmina logirostris*, *Daphnia longispina*. У вирощувальних ставах № 10-Б і № 10-Г основу чисельності (до 50,0–63,5%) формували веслоногі (*Thermocyclops crassus*, *Eucyclops serrulatus*), а біомаси (до 66,4–75,1%) гіллястовусі ракоподібні – *Bosmina logirostris*, *Diaphanosoma brachyurum* (див. рис. 3).

У ФГ «Короп» загальна чисельність зоопланктону у вирощувальному ставі

№ 3 упродовж вегетаційного сезону змінювалась від 76,0 до 161,0 тис. екз./м³, біомаса – від 3,72 до 7,11 г/м³, а у вирощувальному № 4 – відповідно від 26,25 до 61260,0 тис. екз./м³ та від 1,79 до 23,36 г/м³. Вищі показники розвитку тваринного планктону в обох ставах спостерігали на початку вегетаційного сезону, надалі відбувалось поступове зниження біомаси, що пов'язано з активним виїданням його рибою. Середні за період дослідження показники розвитку зоопланктону в даних ставах були на рівні 104,5 ± 28,2–454,7 ± 228,2 тис. екз./м³ за чисельністю та 4,90 ± 1,10–6,88 ± 4,20 г/м³ за біомасою. Основу чисельності зоопланктону у ставі № 3 формували веслоногі (57,6%) та гіллястовусі (37,6%) ракоподібні, а біомаси – гіллястовусі (66,9%) і веслоногі (32,4%) ракоподібні, тоді як у ставі № 4 основу чисельності становили коловертки (до 70,0%), а біомаси – гіллястовусі (до 80,0%) ракоподібні (див. рис. 3). Основними видами, що формували кількісні показники зоопланктону у ставі № 3, були *Moina rectirostris*, *Bosmina longirostris*, *Eucyclops serrulatus*, *Mesocyclops leuckarti*, а у ставі № 4 – *Keratella cochlearis*, *Polyarthra vulgaris*, *Asplanchna priodonta*, *Daphnia longispina*, *Bosmina longirostris*.

Щодо продукційних можливостей, то у вирощувальних ставах за вегетаційний сезон створювалось від 646,8 до 7 720,0 кг/га, у нагульних – від 222,6 до 921,6 кг/га

продукції зоопланктону, що може забезпечити потенційну рибопродуктивність завдяки споживанню зоопланктону на рівні від 46,20 до 552,0 кг/га та від 16,0 до 66,0 кг/га відповідно (табл. 3).

Отже, за інтенсивністю розвитку зоопланктону серед вирощувальних найбільш продуктивні були стави ТзОВ «Карпатський водограй» (№ № 10-Б, 10-В, 10-Г), а серед нагульних – став № 5 ФГ «Короп» (див. табл. 3).

Висновки

Усього за період досліджень у рибницьких ставах різних господарств було виявлено 61 таксономічну одиницю зоопланктонних організмів, із яких 27 видів коловерток, 22 – гіллястовусих, 12 – веслоногих ракоподібних. Виявлено два види зоопланктонних організмів, які раніше в досліджених ставах не траплялися. Видове розмаїття зоопланктону рибницьких ставів у межах господарств було незначним, реєстрували лише від 30 до 37 видів. За фауністичним спектром угруповань у загальному видовому списку зоопланктону переважали представники ротіферно-кладоцерного комплексу.

Відмічено незначну відмінність у видовому складі зоопланктону між рибницькими водоймами господарств ТзОВ «Карпатський водограй» і ДП «ДГ ЛДС ІРГ НААН», ТзОВ «Карпатський водограй» і ФГ «Короп» ($K_s = 0,41-0,48$).

Таблиця 3

Середні за сезон біомаси, продукція зоопланктону та потенційна рибопродуктивність рибницьких ставів Львівської області

Господарства, № ставів	Біомаса, г/м ³	Продукція, кг/га	Потенційна рибопродуктивність ставів завдяки споживанню зоопланктону, кг/га
ДП «ДГ ЛДС ІРГ НААН» нагульні: № 1	1,89	453,6	32,40
№ 2	2,16	518,4	37,03
вирощувальні: № 33	2,94	646,8	46,20
№ 34	5,21	1 146,2	81,87
ТзОВ «Карпатський водограй» нагульні № 1	1,06	222,6	15,90
№ 3	1,54	338,8	24,20
вирощувальні: № 10-Б	25,71	5 142,0	367,29
№ 10-В	38,61	7 722,0	551,57
№ 10-Г	14,68	2 936,0	209,71
ФГ «Короп» нагульний № 5	3,84	921,6	65,83
вирощувальні: № 3	4,90	1 176,0	84,00
№ 4	6,88	1 651,2	117,94

Примітка: для розрахунку було взято продукційно-біомасовий (P/B) коефіцієнт для зоопланктону – 20, а кормовий коефіцієнт – 7.

Серед виявлених видів зоопланктону у ставах різних господарств кількість видів індикаторів сапробності сягала 81,3–93,3%. Основну частку видів-індикаторів сапробності зоопланктону різних рибницьких ставів формували β -мезосапроби (28,1–38,2%) і α - β -мезосапроби (26,5–35,7%), що характерно для рибогосподарських водойм із помірним рівнем органічного забруднення.

Кількісний розвиток зоопланктону у вирощувальних ставах якісно та кількісно задовольняв харчові потреби молоді вирощуваної риби. Середньосезонні біомаси характеризувались оптимальними 2,94–6,88 г/м³ (ФГ «Короп», ДП «ДГ ЛДС ІРГ НААН») і високими 14,68–38,61 г/м³ (ТзОВ «Карпатський водограй») показниками, формувалися в основ-

ному завдяки розвитку цінних у кормовому значенні гіллястовусих ракоподібних (до 66,4–91,8%). У нагульних ставах усіх господарств рівень розвитку зоопланктону був низьким, що вказує на активне споживання його наявною іхтіофауною водойм, середньосезонні біомаси не перевищували 1,06–3,84 г/м³, хоча і формувалися завдяки розвитку ракоподібних (34,4–87,9%).

Розрахунки продукційних можливостей показали, що за вегетаційний сезон у рибницьких ставах створювалося від 222,6 до 7722,0 кг/га продукції зоопланктону, що, у свою чергу, може забезпечити потенційну рибопродуктивність завдяки споживанню зоопланктону на рівні від 16,0 до 552,0 кг/га.

Список використаної літератури

- Гіллястовусі ракоподібні роду *Diaphanosoma* (Crustacea: Cladocera) водойм та водотоків України/Ю.Ф. Громова та ін. *Гідробіологічний журнал*. 2018. Т. 54. № 4. С. 29–34.
- Кражан С.А., Хижняк М.І. Природна кормова база рибогосподарських водойм. Херсон : Олді Плюс, 2014. 330 с.
- Куць Ю.С., Тучапська А.Я., Добрянська О.П., Куріненко Г.А. Вплив екологічних умов на вирощування цьоголіток коропо-сазанових гібридів різного походження. *Агроекологічний журнал*. 2021. № 1. С.106–114. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2021.227247>
- Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / [Арсан О.М., Давидов О.А., Дьяченко Т.М. та ін.]; за ред. В.Д. Романенка. Київ : ЛОГОС, 2006. 408 с.
- Микітчак Т.І. Попередній анатомічний список каланоїд і циклопоїд (Crustacea: Calanoida and Cyclopoida) Українських Карпат. *Біологічні студії/Studia Biologica*. 2018. 12. № 2. С.87–98. <https://doi.org/10.30970/sbi.1202.555>
- Микітчак Т., Коваль Н. Гіллястовусі (Cladocera) й веслоногі (Copepoda Cyclopoida Calanoida) ракоподібні верхів'я р. Уж (Українські Карпати). *Вісник Львівського університету. Серія Біологія*. 2018. Вип. 77. С.129–136.
- Монченко В.І. Щелепнороті циклопоподібні, циклопи (Cyclopidae). Фауна України. Київ : Наукова думка, Т.27, вип.3. 1974. 450 с.
- Олешко М.О., Олешко О.А., Мельниченко О.М., Бітюцький В.С., Гейко Л.М. Формування природної кормової бази за рахунок планктонних угруповань на дослідних ставах ВАТ «Сквирапалемрибгосп» за вирощування цьоголіток помісних коропів. *Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва*. 2016. № 2. С. 82–88.
- Пукало П.Я., Божик Л.Я., Думич О.Я., Тонконоженко С.М. Умови вирощування коропа у нагульних ставах рибного господарства «Янів». *Науковий вісник ЛНУВМБ імені С. З. Гжицького. Серія: Сільськогосподарські науки*. 2020. 22. № 93. С. 35–39. <https://doi.org/10.32718/nvl-vet-a9306>
- Романенко В. Д., Якушин В. М., Щербак В. І. та ін. Біорізноманіття та біоресурсний потенціал екосистеми Дніпровських водосховищ в умовах кліматичних змін і розвитку біологічної інвазії. Київ : Наукова думка, 2019. 258 с.
- Battes K.P., Váncsa É., Barbu-Tudoran L., & Cîmpean M.A species on the rise in Europe: *Sinodiaptomus sarsi* (Rylov, 1923) (Copepoda, Calanoida), a new record for the Romanian crustacean fauna. *BioInvasions Records*. 2020. Vol. 9 (2). P. 320–332. <https://doi.org/10.3391/bir.2020.9.2.17/>
- Boxshall G., Defaye D. Calanoida / World checklist of freshwater Copepoda species. 2009. [World Wide Web electronic publication]. [Електронний ресурс]. URL: <http://fada.biodiversity.be/group/show/19> (дата звернення 10.09.2021)
- Bledzki L.A., Rybak J.I. Freshwater Crustacean Zooplankton of Europe Cladocera & Copepoda (Calanoida, Cyclopoida) *Key to species identification*. Springer International Publishing Switzerland, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29871-9>

Burian Z.V., Trokhymets V.M. The temporal dynamics of zooplankton communities of different types of water bodies within Ichniansky National Park. *Biosystems Diversity*. 2017. Vol. 25. P. 124–131. <https://doi.org/10.15421/011719>

Czerniawski R., Domagal J. Reduction of zooplankton communities in small lake outlets in relation to abiotic and biotic factors. *Oceanological and Hydrobiological Studies*. 2013. Vol. 42 (2). P. 123–131.

Dexter E., Bollens S. M. Zooplankton invasions in the early 21st century: a global survey of recent studies and recommendations for future research. *Hydrobiology*. 2020. 847. P. 309–319 <https://doi.org/10.1007/s10750-019-04096-x>

Gunduz E. *Sinodiaptomus sarsi* (Rylov, 1923) (Copepoda Calanoida) in Turkey. *Hidrobiologia*. 1998. Vol. 380. P. 9–13.

Hryhorenko T.V., Samchyshyna L.V., Chuzhma N.P., Bazaieva A.M., Savenko N.M., Oborsky V.P., Mykhailenko N.G. Assessment of ecological conditions for growing the market-size fish in the Kantivka fattening pond (Khmelnychchyna, Ukraine). *Ukrainian Journal of Veterinary and Agricultural Sciences*. 2021. Vol. 4 (3). P. 33–41. <https://doi.org/10.32718/ujvas4-3.06>

Kiefer F. *Das Zooplankton der Binengewasser 2. Teil, Freilebende Copepoda*. E. Schweizerbart sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1978, 1–380.

Kotov A., Forry L., Korovchisky N., Petrussek A. Cladocera / World checklist of freshwater Cladocera species. // [World Wide Web electronic publication] 2014. Available online. [Electronic resource] URL: <http://fada.bio-diversity.be/group/show/17> (access date 10.09.2021)

Pearson A.C., Duggan I.C. A global review of zooplankton species in freshwater aquaculture ponds: what are the risks for invasion? *Aquatic Invasions*. 2018. Vol. 13 (3). P. 311–322. <https://doi.org/10.3391/ai.2018.13.3.01>

Rudescu L. *Fauna Republicii Socialiste Romania*, 1960, V. II, fasc. 2, *Rotatoria*, 1192 c.

Sorensen T. A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content. *Det. Kong. Danske Vidensk. Selsk. Boil. Skr.* (Kopenhagen). 1948. V. 5(4). P. 1–34 [Cited in Mueller-Dombois and Ellenberg (1974:214)].

Svetlichny L., Samchyshyna L. A new finding of the non-native Copepod *Sinodiaptomus Sarsi* (Copepoda, Calanoida, Diaptomidae) in Ukraine. *Zoodiversity*. 2021. Vol. 55 (1). P. 1–8. <https://doi.org/10.15407/zoo2021.01.001>

References (translated and transliterated)

Gromova, Yu.F., Protasov, A.A., & Guleykova, L.V. (2018). Hilliastovusi rakopodibni rodu *Diaphanosoma* (Crustacea: Cladocera) vodoim ta vodotokiv Ukrainy [Crustaceans of the genus *Diaphanosoma* (Crustacea: Cladocera) of reservoirs and water bodies Kyiv of Ukraine]. *Hidrobiolohichnyi zhurnal [Hydrobiological journal]*. 4 (54), 29–34 [in Ukrainian].

Krazhan, S.A., & Khyzhniak, M.I. (2014). Pryrodna kormova baza rybohospodarskykh vodoim [Natural forage base of the fishing ponds]. Kherson : Oldi-Plus [in Ukrainian].

Kuts, Yu.S., Tuchapska, A.Ya., Dobryanska, O.P., & Kurinenko, G.A. (2021). Vplyv ekolohichnykh umov na vyroshchuvannya ts'oholitok koropo-sazanovykh hibrydiv riznoho pokhodzhennya [The influence of environmental conditions on the cultivation of carp-carp hybrids of various origins this summer]. *Ahroekolohichnyy zhurnal [Agroecological journal]*, 1, 106–114 <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2021.227247> [in Ukrainian].

Metody hidroekolohichnykh doslidzhen' poverkhnevnykh vod. [Methods of hydroecological research of surface waters]. (2006). / [Arsan, O.M., Davydov, O.A., D'yachenko, T.M. ta in.]; za red. V.D. Romanenka. Kyiv: LOHOS [in Ukrainian].

Mykitchak, T.I. (2018). Poperednii anatovanyi spysok kalanoid i tsyklopoid (Crustacea: Calanoida and Cyclopoida) Ukrainskykh karpats. [Preliminary annotated list of calanoids and cyclopoida (Crustacea: Calanoida and Cyclopoida) of the Ukrainian Carpathians]. *Studia Biologica*, 12 (2), 87–98. <https://doi.org/10.30970/sbi.1202.555> [in Ukrainian].

Mykitchak, T., & Koval, N. (2018). Hilliastovusi (Cladocera) y veslonohi (Copepoda Cyclopoida Calanoida) rakopodibni verkhivya r. Uzh (Ukrainski Karpaty) [Cladocera and Copepoda Cyclopoida Calanoida crustaceans of the upper reaches of the Uzh River (Ukrainian Carpathians)]. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Seriya Biolohiia [Visnyk of Lviv University. Biological series]*, 77, 129–136 [in Ukrainian].

Monchenko, V.I. (1974). Shhelepnototi cyklopopodibni, cyklopy (Cyclopidae). [Gnathostomes cyclopoids (Cyclopidae)]. Fauna of Ukraine. Kyiv : Naukova dumka [in Ukrainian].

Oleshko, M.O., Oleshko, O.A., Melnychenko, O.M., Bitiutskyi, V.S., & Heiko, L.M. (2016). Formuvannia pryrodnoi kormovoi bazy za rakhunok planktonnykh uhrupovan na doslidnykh stavakh

VAT «Skvyraplemrybhosp» za vyroshchuvannia tsoholitok pomisnykh koropiv [The formation of a natural feed base due to plankton groups in the experimental ponds of OJSC «Skviraplemrybhosp» for the cultivation of local carp this summer]. *Tekhnolohiia vyrobnytstva i pererobky produktsii tvarynnytstva [Animal Husbandry Products Production and Processing]*, 2, 82–88 [in Ukrainian].

Pukalo, P.Ja., Bozhyk, L.Ja., Dumych, O.Ja., & Tonkonozhenko, S.M. (2020). Umovy vyroshhuvannja koropa u naghuljnykh stavakh rybnogho ghospodarstva «Janiv» [Conditions for carp growing in feeding ponds of the “Yaniv” fishery]. *Naukovyj visnyk LNUVMB imeni S.Z. Ghzhyckogho. Serija: Siljskoghospodarsjki nauky [Scientific Messenger of LNUVMB. Series: Agricultural sciences]*, 22 (93), 35–39. <https://doi.org/10.32718/nvlvet-a9306> [in Ukrainian].

Romanenko, V.D., Yakushyn, V.M., & Shcherbak, V.I., et al. (2019). Bioriznomanittia ta bioresursnyi potentsial ekosystemy Dniprovskykh vodoskhovyshch v umovakh klimatychnykh zmin i rozvytku biolohichnoi invazii [Biodiversity and bioresource potential of the ecosystem of the Dnieper reservoirs under conditions of climate change and the development of biological invasion]. Kyiv : Naukova dumka [in Ukrainian].

Battes, K.P., Vancsa, E., Barbu-Tudoran, L., & Cimpean, M. (2020). A species on the rise in Europe: *Sinodiaptomus sarsi* (Rylov, 1923) (Copepoda, Calanoida), a new record for the Romanian crustacean fauna. *BioInvasions Records*, 9 (2), 320–332. <https://doi.org/10.3391/bir.2020.9.2.17> [in English].

Boxshall, G., & Defaye, D. (2009). Calanoida / World checklist of freshwater Copepoda species. [Electronic resource] URL: <http://fada.biodiversity.be/group/show/19> (access date 10.09.2021) [in English].

Bledzki, & Rybak. (2016). Freshwater Crustacean Zooplankton of Europe Cladocera & Copepoda (Calanoida, Cyclopoida) *Key to species identification*. Springer International Publishing Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29871-9> [in English].

Burian, Z.V., & Trokhymets, V.M. (2017). The temporal dynamics of zooplankton communities of different types of water bodies within Ichniansky National Park. *Biosystems Diversity*, 25 (2), 124–131. <https://doi.org/10.15421/011719> [in English].

Czerniawski, R., & Domagal, J. (2013). Reduction of zooplankton communities in small lake outlets in relation to abiotic and biotic factors. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 42 (2), 123–131 [in English].

Dexter, E., & Bollens, S.M. (2020). Zooplankton invasions in the early 21st century: a global survey of recent studies and recommendations for future research. *Hydrobiology*, 847, 309–319 <https://doi.org/10.1007/s10750-019-04096-x> [in English].

Gündüz, E. (1998). *Sinodiaptomus Sarsi* (Rylov, 1923) (Copepoda Calanoida) in Turkey. *Hidrobiologia*, 380, 9–13 [in English].

Hryhorenko, T.V., Samchyshyna, L.V., Chuzhma, N.P., Bazaieva, A.M., Savenko, N.M., Oborsky, V.P., & Mykhailenko, N.G. (2021). Assessment of ecological conditions for growing the market-size fish in the Kantivka fattening pond (Khmelnychchyna, Ukraine). *Ukrainian Journal of Veterinary and Agricultural Sciences*, 4 (3), 33–41. <https://doi.org/10.32718/ujvas4-3.06> [in English].

Kiefer, F. (1978). *Das Zooplankton der Binengewasser 2. Teil, Freilebende Copepoda*. E.Schweizerbant sche Verlasbuchhandlung, Stuttgart, 1-380 [in German].

Kotov, A., Forry, L., Korovchisky, N., & Petrusek, A. (2014). Cladocera / World checklist of freshwater Cladocera species. [Electronic resource] URL: <http://fada.bio-diversity.be/group/show/17> (access date 10.09.2021) [in English].

Pearson, A.C., & Duggan, I.C. (2018). A global review of zooplankton species in freshwater aquaculture ponds: what are the risks for invasion? *Aquatic Invasions*. 13 (3), 311–322. <https://doi.org/10.3391/ai.2018.13.3.01> [in English].

Rudescu, L. (1960). *Fauna Republicii Socialiste Romania, Rotatoria*, II (2), 1-1192 [in English].

Sorensen, T. (1948). A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content. Det. Kong. Danske Vidensk. Selsk. Boil. Skr. (Kopenhagen), 5 (4): 1–34 [Cited in Mueller-Domlois and Ellenberg (1974:214)] [in English].

Svetlichny, L., & Samchyshyna, L. (2021). A new finding of the non-native Copepod *Sinodiaptomus Sarsi* (Copepoda, Calanoida, Diaptomidae) in Ukraine. *Zoodiversity*, 55 (1), 1–8. <https://doi.org/10.15407/zoo2021.01.001> [in English].

Отримано: 14.09.2023

Прийнято: 28.09.2023



УДК 547.82:616.831-005]:599.323.452
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.5>

ВПЛИВ ДИНАТРИЄВОЇ СОЛІ 2-(ПІРИДИН-4-ІЛТІО)БУРИТИНОВОЇ КИСЛОТИ НА ПОКАЗНИКИ ІШЕМІЧНОГО ПОШКОДЖЕННЯ ГОЛОВНОГО МОЗКУ ЩУРІВ

Ю. Ю. Петруша¹

Робота присвячена дослідженню впливу динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтїо)буриштинової кислоти на показники ішемічного пошкодження головного мозку щурів лінії Вістар. Вплив сполуки вивчали на моделі неповної глобальної ішемії головного мозку, яка найбільш адекватна клінічним проявам ішемічного інсульту. Визначали ступінь неврологічного дефіциту за шкалою stroke-index С.Р. McGrow та проводили біохімічні дослідження. Отримані результати показали значні нейропротективні властивості динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтїо)буриштинової кислоти в умовах експериментального гострого порушення мозкового кровообігу, що виражалось у зменшенні летальності тварин у гострий період експериментальної патології та зменшенні кількості тварин з тяжкою неврологічною симптоматикою в гострий період мозкового інсульту. Динатрієва сіль 2-(піридин-4-ілтїо)буриштинової кислоти вірогідно зменшувала кількість парезів, геміпарезів, нормалізувала орієнтовно-дослідницьку діяльність. Е введення динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтїо)буриштинової кислоти приводило до збільшення синтезу АТФ, зниження АМФ, зменшення нейротоксичних продуктів окиснювальної модифікації протеїнів – альдегід- і кетонфенілгідрозонів. У разі введення досліджуваної сполуки спостерігалось підвищення активності основних антиоксидантних ферментів: супероксиддисмутази, каталази та глутатіонпероксидази. Вірогідно, одним із можливих механізмів нейропротективної дії є здатність цієї сполуки гальмувати окиснювальну модифікацію білкових макромолекул головного мозку та зменшувати ступінь інгібування активності ферментів антиоксидантного захисту. Іншим можливим механізмом є здатність динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтїо)буриштинової кислоти активувати біоенергетичні процеси та зменшувати ішемічне пошкодження нервової тканини. За силою нейропротективного ефекту динатрієва сіль 2-(піридин-4-ілтїо)буриштинової кислоти переважає відомий препарат «Мексидол». На основі виконаних досліджень можна рекомендувати динатрієву сіль 2-(піридин-4-ілтїо)буриштинової кислоти як перспективну субстанцію для створення на її основі нових ветеринарних і лікарських засобів.

Ключові слова: гостре порушення мозкового кровообігу, нейропротективна активність, динатрієва сіль 2-(піридин-4-ілтїо)буриштинової кислоти.

¹ кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри хімії
(Запорізький національний університет, м. Запоріжжя)
e-mail: Yulia.ZNU@ukr.net
ORCID: 0000-0003-3041-2877

EFFECT OF DISODIUM SALT OF 2-(PYRIDIN-4-YLTHIO)SUCCINIC ACID ON INDICATORS OF ISCHEMIC BRAIN DAMAGE IN RATS

Yu. Yu. Petrusha

The work is devoted to the study of the effect of the disodium salt of 2-(pyridin-4-ylthio)succinic acid on indicators of ischemic brain damage in Wistar rats. The effect of the compound was studied on the model of incomplete global ischemia of the brain. This model is the most adequate to the clinical manifestations of ischemic stroke. We determined the degree of neurological deficit according to the stroke-index scale of C.P. McGrow and conducted biochemical studies. The obtained results showed significant neuroprotective properties of the disodium salt of 2-(pyridin-4-ylthio)succinic acid in the conditions of experimental acute disruption of cerebral blood circulation. This was expressed in a decrease in the mortality of animals in the acute period of experimental pathology and a decrease in the number of animals with severe neurological symptoms in the acute period of cerebral circulation. stroke. Disodium salt of 2-(pyridin-4-ylthio)succinic acid probably reduced the number of paresis, hemiparesis, and normalized research activities. The introduction of the disodium salt of 2-(pyridin-4-ylthio)succinic acid led to an increase in the synthesis of ATP, a decrease in AMP, and a decrease in neurotoxic products of oxidative modification of proteins – aldehyde- and ketonephenylhydrazones. An increase in the activity of the main antioxidant enzymes: superoxidedismutase, catalase and glutathioneperoxidase was observed when using the studied compound. Probably, one of the possible mechanisms of neuroprotective action is the ability of this compound to inhibit the oxidative modification of protein macromolecules of the brain and to reduce the degree of inhibition of the activity of antioxidant defense enzymes. Another possible mechanism is the ability of the disodium salt of 2-(pyridin-4-ylthio)succinic acid to activate bioenergetic processes and reduce ischemic damage to nerve tissue. In terms of its neuroprotective effect, the disodium salt of 2-(pyridin-4-ylthio)succinic acid is superior to the well-known drug «Mexidol». On the basis of the conducted research, the disodium salt of 2-(pyridin-4-ylthio)succinic acid can be recommended as a promising substance for the creation of new veterinary and medicinal products on its base.

Key words: acute cerebrovascular accident, neuroprotective activity, disodium salt of 2-(pyridin-4-ylthio)succinic acid.

Вступ

За останні три десятиліття спостерігається активне збільшення частки судинних захворювань, а серед них, зокрема, гострих порушень мозкового кровообігу (далі – ГПМК), серед хвороб, що спричиняють інвалідизацію та смертність населення України та зарубіжжя. Ішемія головного мозку зазвичай супроводжується значними неврологічними розладами, зокрема порушенням когнітивних (ослаблення пам'яті, орієнтації, уваги, здатності до навчання й інтелектуальної діяльності), моторних, вербальних та інших функцій центральної нервової системи (далі – ЦНС) (Беленічев і Демченко, 2015; Самелюк, 2016; Sekhon et al., 2017).

У процесі ішемічного пошкодження мозку знижується мозковий кровоток, що спричиняє гіпоксичну функцію мітохондрій, порушення енергетичного обміну та глутаматну ексайтотоксичність. Також відбувається розлад іонного гомеостазу клітини, водночас підвищується внутрішньоклітинний вміст Ca^{2+} та прискорюється синтез нітроген (II) оксиду, накопичується молочна кислота, активуються внутрішньо-

клітинні протеолітичні ферменти. Таким чином, розвивається окислювальний стрес, експресія генів, стійка деполаризація мембран і загибель клітин (Пат. 98871 Україна, 2015; Самелюк, 2016).

Відповідно є зрозумілою особлива цікавість і увага дослідників до пошуку способів фармакологічної корекції цих порушень, а також препаратів, які знижують ступінь нейродегенерації в разі ішемії головного мозку. Багато вчених вважають, що метаболічна терапія в гострому періоді інсульту та в періоді відновлення є потужним превентивним чинником щодо повторних інсультів, інвалідизації хворих і їх загибелі (Беленічев і Демченко, 2015; Liguori et al., 2018; Iakovou & Kourti, 2022). Тобто особливо доцільним є включення до комплексної терапії мозкових інсультів препаратів, які мають енерготропну, антиоксидантну, протиішемічну та ноотропну дію.

Нині для нейропротекції використовують обмежене коло препаратів нейротропного типу дії, зокрема деякі похідні бурштинової кислоти. Наприклад, «Мексидол» або етил-метил-гідроксипіридину сукцинат. Бурштинова кислота – одна з найважливіших

складових частин природних біохімічних процесів у мозку. Вона виконує центральну роль у реакціях циклу Кребса (цикл трикарбонових кислот) – комплекси фундаментальних функціонально-метаболических реакцій, що забезпечують повноцінну біоенергетику нервових клітин. Установлено, що енергетичний вихід синтезу аденозинтрифосфату (далі – АТФ) у процесі окиснення бурштинової кислоти значно вищий, ніж у разі окиснення інших речовин. Окрім того, фермент сукцинатдегідрогеназа є ключовою ланкою антиоксидантного захисту організму від вільних радикалів, а бурштинова кислота є потужним антиоксидантом спрямованої мітохондріальної дії (Бурчинський, 2021; Zarubin et al., 2012).

Тому метою нашої роботи було поглиблене дослідження впливу синтезованої нами нетоксичної сполуки – динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти – на показники ішемічного пошкодження головного мозку щурів. Досліджувана речовина за попередніми дослідженнями має також значну антигіпоксичну, ноотропну й антидепресивну активність (Петруша, 2015, 2016).

Матеріал і методи

Експеримент здійснювали на білих щурах лінії Вістар обох статей вагою 220–260 г. Для визначення впливу на параметри ішемічного пошкодження головного мозку була застосована модель неповної глобальної ішемії, яка відповідає клінічним проявам ішемічного інсульту зі зниженням системного артеріального тиску. Було здійснено двобічну перев'язку загальних сонних артерій під наркозом (Етаміналнатрій, 40 мг/кг) шляхом виділення сонних артерій і накладання на них шовкової лігатури. Порушення, що виникають у разі використання цієї моделі оклюзії артерій, часто спостерігаються в людей похилого віку, піддаються терапії та мають зворотний характер.

Досліджувана сполука є кристалічною речовиною бузкового кольору з температурою плавлення 238–240 °С, розчиняється у воді та метанолі. За хімічною будовою вона є похідним піридину та має структурну схожість із природними речовинами – вітамінами В₆ і В₃ (нікотиновою кислотою).

Динатрієву сіль 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти вводили пероральним шляхом у дозі 100 мг/кг 1 раз на добу протягом усього дослідження. Як еталон для порів-

няння використовували «Мексидол» за тією самою схемою в дозі 250 мг/кг внутрішньочеревно. «Мексидол» (3-гідрокси-6-метил-2-етилпіридин сукцинат) було обрано як препарат порівняння, оскільки він за хімічною будовою та досліджуваною біологічною дією дуже схожий на динатрієву сіль 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти. «Мексидол» – це препарат, що має відомі антиоксидантні властивості, є регулятором метаболічної активності клітин та інгібітором вільнорадикальних процесів і пероксидного окиснення ліпідів (Важничка та ін., 2022). Інтактом були удавано оперовані тварини, яким під наркозом (Етаміналнатрій, 40 мг/кг) виділяли сонні артерії, але не перев'язували їх.

Неврологічний статус щурів характеризували згідно зі шкалою stroke-index С.Р. McGrow (McGrow, 1977). Тяжкість стану оцінювали за сумою балів: до 3 балів – легкий ступінь, від 3 до 7 балів – середній ступінь, від 7 балів і вище – тяжкий ступінь. Фіксували обмеження довільних рухів (парези) та цілковиту їх відсутність (параліч), тремтіння, опущення верхньої повіки, періодичні довільні рухи по колу, положення на боці тощо. Проводили також тест «стрижня, що обертається» (діаметр 15 см, швидкість 3 об./хв). Динаміку дефіциту оцінювали щоденно.

Для визначення ступеня ішемічного пошкодження тканин мозку та дієвості фармакологічної корекції здійснювали біохімічні дослідження артеріальної крові. Для вивчення запізнених наслідків впливу досліджуваної речовини в щурів на 4-ту добу після оклюзії сонних артерій вилучався головний мозок. Для подальших біохімічних досліджень використовували лобні долі кори. Мозкові тканини гомогенізували та вилучали цитозольну фракцію (центрифугування за 15 000 g). Екстракт без білків отримували додаванням точної наважки гомогенату тканини мозку в перхлоратну кислоту з подальшою нейтралізацією розчином К₂СО₃ (Компанець і Остапченко, 2013).

Стан антиоксидантної (далі – АО) системи вивчали за активністю комплексу показників: супероксиддисмутази (далі – СОД), каталази, глутатіонпероксидази (далі – ГПР), показниками окиснювальної модифікації протеїнів (далі – ОМП) у тканинах головного мозку тварин.

Вивчення активності супероксиддисмутази згідно з методикою Чеварі та спі-

вавторів (Компанець і Остапченко, 2013; Остапченко та ін., 2017). СОД конкурує з нітросинім тетразолоєм (далі – НСТ) за супероксидрадикали, які утворюються у процесі аеробної взаємодії відновленого нікотинамідаденіндинуклеотиду (далі – НАДН) та феназинметасульфату. У результаті цієї реакції відбувається відновлення НСТ до гідрозинтетразолію. За присутності супероксиддисмутази частка відновлення НСТ змінюється. Активність СОД виражали в у.о./мг білка/хв.

Активність каталази визначали спектрофотометричним методом (Компанець і Остапченко, 2013; Остапченко та ін., 2017). Каталаза, що міститься у пробі, розкладає гідроген пероксид. Залишок перекису визначали за реакцією з амоній молібдатом. Активність ферменту оцінювали за ступенем розкладання гідроген пероксиду та виражали у мкат/мг білка/хв.

Активність ГПР визначали за методикою (Чекман та ін., 2016). ГПР відновлює гідроперекис *трет*-бутилу за допомогою глутатіону відновленого (далі – GSH). Залишок відновленого *трет*-бутилу визначали за інтенсивністю забарвлення з натрій нітросульфидом, що має максимум поглинання за довжини хвилі 540 нм. Активність ГПР оцінювали за спадом GSH і виражали у мкмоль GSH/мг білка/хв.

Показники ОМП у тканинах головного мозку вивчали за методом В. Halliwell (Halliwell, 1999). Стан енергетичного обміну визначали за рівнем аденілових нуклеотидів (АТФ, АДФ, АМФ), а також лактату, пірувату та малату. Про ішемічне пошкодження тканин головного мозку робили висновок за гіперферментомією ізоферменту креатинфосфокінази (ВВ-КФК, К.Ф. 2.7.3.2).

Кількість малату визначали за методом Хохорста (Чекман та ін., 2016), який базується на тому, що за наявності малатдегідрогенази малат перетворюється на щавлевооцтову кислоту. Зв'язування щавлевооцтової кислоти гідрозин-гліцеринним буфером забезпечує повне окиснення малату:

Малат + НАД⁺ + гідрозин ↔ оксалоацетат-гідрозин + НАДН + Н₂О.

Утворення відновленої форми НАДН еквівалентне кількості окисненого малату, збільшення якого фіксують за 340 нм. Аденілові нуклеотиди (АТФ, АДФ, АМФ) визначали методом тонкошарової хроматографії (Чекман та ін., 2016).

Вміст пірувату визначали за методом Цоха – Ломпрехта (Чекман та ін., 2016), який

базується на тому, що за наявності лактатдегідрогенази (далі – ЛДГ) піруват відновлюється до лактату:

Піруват + НАДН + Н⁺ ↔ лактат + НАД⁺.

Кількість використаного в реакції пірувату еквівалентна кількості НАДН, зменшення якого відзначається за 340 нм.

Вміст лактату вивчали за методом Хохорста (Чекман та ін., 2016). Сутність методу полягає в тому, що за наявності лактатдегідрогенази лактат перетворюється на піруват, причому зв'язування пірувату, який утворюється під час реакції, гідрозин-гліцеринним буфером сприяє повному окисненню лактату:

Лактат + НАД⁺ + гідрозин ↔ гідрозин-піруват + НАДН + Н₂О.

Утворення відновленої форми НАД еквівалентно кількості окисненого лактату, збільшення якого фіксують за 340 нм.

Активність креатинфосфокінази визначали після розділення на сефадексі ДЕАЕ-А-50 за допомогою оптичного тесту Варбурга та виражали в мкм/л/год (Беленічев, 2015).

Статистичну обробку результатів дослідження проводили за допомогою методів варіаційного аналізу з використанням стандартного пакету комп'ютерних програм MS Excell. Обчислювали середнє арифметичне значення кожного з показників (М) та похибки середньоквадратичного відхилення досліджених речовин (s). Для оцінки вірогідності відмінностей між середніми величинами застосовували t-критерій Ст'юдента. Відмінності отриманих даних уважали статистично достовірними у тих випадках, коли ймовірність випадковості у відмінності між показниками не перевищувала 0,05 (Мехед і Ткаченко, 2020).

Результати

Перев'язування загальних сонних артерій спровокувало в щурів важкі неврологічні порушення, які максимально проявилися на 4-ту добу експерименту. Спостерігалось часткове та цілковите обмеження рухів (парези та параліч), і опущення верхньої повіки (птоз). У контрольній групі щурів (тварини, що не отримували лікування) було відмічено тяжкий ступінь прояву неврологічних симптомів (табл. 1). Їхній середній бал за шкалою С.Р. McGrow був 19,7 бали, а виживання тварин становило 33%.

Уведення щурам із ГПМК динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти здійснювало виражений нейропротективний

ефект. На 4-ту добу дослідження середній бал у цій групі був 14,5, а летальність зменшилася на 34% порівняно з контролем. Однак 80% тварин демонстрували тяжкий комплекс неврологічних симптомів. Препарат порівняння «Мексидол» за силою нейропротективного ефекту поступався динатрієвій солі 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти.

Біохімічні аналізи продемонстрували (табл. 2, 3), що двобічна оклюзія загальних сонних артерій спричиняє типові ішемічні

розлади: зменшення вмісту макроергічних сполук (АТФ), порушення циклу Кребса, стимуляцію анаеробного гліколізу, активацію оксидативного стресу.

На моделі гострого порушення мозкового кровообігу було виявлено зростання альдегідних (АФГ) і карбоксильних (КФГ) продуктів ОМП у тканинах мозку піддослідних тварин на 4-ту добу експерименту (табл. 4).

Результати вивчення дії досліджуваної сполуки на активність основних антиокси-

Таблиця 1

Вплив динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти на виживання та розвиток неврологічного дефіциту в щурів після ГПМК

Група тварин	Кількість щурів із тяжкою симптоматикою, %	Середній бал за шкалою С.Р. McGrow	Кількість тварин, що вижили на 4-ту добу, %
	На 4-ту добу	На 4-ту добу	
Інтактні тварини	0	2,00 ± 0,60	100
Тварини з ГПМК	100	19,7 ± 1,77	33
Тварини з ГПМК + динатрієва сіль 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти	80	14,5 ± 1,22*	66*
Тварини з ГПМК + Мексидол	87,5	15,3 ± 1,3*	53*

Примітка: * – $p < 0,05$ щодо контролю.

Таблиця 2

Вплив динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти на вміст аденілових нуклеотидів у головному мозку й активність ВВ-КФК у сироватці крові щурів на 4-ту добу після ГПМК

Група тварин	АТФ мкмоль/г тканини	АДФ мкмоль/г тканини	АМФ мкмоль/г тканини	ВВ-КФК ммоль/л/год
Інтактні тварини	2,01 ± 0,02	0,53 ± 0,007	0,12 ± 0,003	0,04 ± 0,001
Тварини з ГПМК	1,07 ± 0,01	0,24 ± 0,007	0,23 ± 0,002	0,15 ± 0,004
Тварини з ГПМК + динатрієва сіль 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти	1,54 ± 0,01*	0,45 ± 0,002*	0,14 ± 0,001*	0,075 ± 0,001*
Тварини з ГПМК + Мексидол	1,33 ± 0,04*	0,44 ± 0,002*	0,14 ± 0,002*	0,091 ± 0,002*

Примітка: * – $p < 0,05$ щодо контролю.

Таблиця 3

Вплив динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти на показники вуглеводного обміну в головному мозку щурів на 4-ту добу після ГПМК

Група тварин	Піруват мкмоль/г тканини	Лактат мкмоль/г тканини	Малат мкмоль/г тканини
Інтактні тварини	0,51 ± 0,06	2,7 ± 0,02	0,27 ± 0,02
Тварини з ГПМК	0,22 ± 0,01	9,2 ± 0,04	0,12 ± 0,01
Тварини з ГПМК + динатрієва сіль 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти	0,42 ± 0,02*	3,4 ± 0,04*	0,37 ± 0,03*
Тварини з ГПМК + Мексидол	0,37 ± 0,04*	4,8 ± 0,01*	0,26 ± 0,02*

Примітка: * – $p < 0,05$ щодо контролю.

Таблиця 4

Вплив динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти на ОМП у головному мозку щурів на 4-ту добу після ГПМК

Група тварин	Продукти ОМП, у.о./г білка	
	АФГ (270 нм)	КФГ (363 нм)
Інтактні тварини	5,3 ± 0,12	7,0 ± 0,31
Тварини з ГПМК	15,5 ± 0,33	27,1 ± 1,33
Тварини з ГПМК + динатрієва сіль 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти	7,4 ± 0,43*	10,2 ± 0,87*
Тварини з ГПМК + Мексидол	10,1 ± 0,21*	16,1 ± 0,91*

Примітка: * – $p < 0,05$ щодо контролю.

Таблиця 5

Вплив динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти на активність антиоксидантних ферментів у головному мозку щурів на 4-ту добу після ГПМК

Група тварин	СОД, у.о./мг білка/хв	Каталаза, мкат/мг білка/хв	ГПР, мкмоль/мг білка/хв
Інтактні тварини	255,2 ± 16,6	14,5 ± 2,85	67,3 ± 4,5
Тварини з ГПМК	123,5 ± 11,5	8,0 ± 0,8	40,2 ± 2,7
Тварини з ГПМК + динатрієва сіль 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти	245,8 ± 14,2*	11,0 ± 0,78*	57,6 ± 3,3*
Тварини з ГПМК + Мексидол	201,5 ± 12,1*	10,7 ± 1,57*	44,5 ± 4,7

Примітка: * – $p < 0,05$ щодо контролю.

дантних ферментів: СОД, каталази та ГПР наведено в таблиці 5.

Обговорення

Проведене нами експериментальне дослідження нейропротективної активності динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти продемонструвало окремі аспекти прояву біологічного ефекту досліджуваної сполуки.

Уведення досліджуваної речовини піддослідним тваринам сприяло підвищенню утворення АТФ шляхом активування аеробного способу окиснення (див. табл. 2). Про це свідчить вірогідне збільшення вмісту малату, зменшення рівня лактату, що вказує на його утилізацію у процесі мітохондріального окиснювального фосфорильовання, та зростання рівня пірувату порівняно з контролем. Треба відзначити, що динатрієва сіль 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти призводила до зростання вмісту АТФ на тлі зниження аденозинмонофосфату, який є прооксидантом. Ефект «Мексидолу» був схожим за направленістю, але менш вираженим за дією щодо зміни показників біоенергетики (див. табл. 3).

Суттєвою ланкою нейропротективної дії динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти є її антиоксидантна активність. Найбільш важливим аспектом антиоксидантного ефекту динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти

в умовах ГПМК був захист протеїнових макромолекул рецепторів, іонних каналів від пошкоджувальної дії активних форм кисню та нітрогену, що призводить до гальмування ОМП. Подібна дія характерна для найбільш активних вторинних нейропротекторів, зокрема і для «Мексидолу».

Багато авторів відносять ОМП до найбільш важливої ланки патогенезу ішемії головного мозку через те, що окиснення протеїнових макромолекул рецепторів, іонних каналів призводить до порушення генерації, передавання та розпізнавання нервового імпульсу, порушення функціональної дії нейронів і, у результаті, до розвитку неврологічного та когнітивного дефіциту (Самелюк, 2016; Литвиненко, 2018; Halliwell & Gutteridge, 1985). Уведення препарату порівняння «Мексидолу» приводило до вірогідного зменшення нейротоксичних продуктів ОМП – АФГ і КФГ. Динатрієва сіль 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти здійснювала більш потужний вплив на стан пероксидного окиснення ліпідів, у результаті чого спостерігалось вірогідне зниження нейротоксичних і цитотоксичних продуктів ОМП (див. табл. 4).

Одним із механізмів АО дії динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти є її позитивний вплив на антиоксидантну систему головного мозку. У разі введення досліджуваної сполуки спостерігалось підви-

щення активності основних АО-ферментів: СОД, каталази та ГПР (див. табл. 5). Фермент супероксиддисмутаза є найважливішою ланкою природної антиоксидантної системи організму. За силою антиоксидантної дії динатрієва сіль 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти значно переважала еталон порівняння «Мексидол».

Результатом позитивної дії динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти на показники вуглеводно-енергетичного обміну та розвиток оксидативного стресу в умовах ГПМК було збереження цілісності мембран нейроцитів. Це підтверджувало вірогідне зниження гіперферментомії ВВ-ізоформи креатинфосфокінази щодо контролю та групи тварин із ГПМК, яка отримувала «Мексидол». Ця ізоформа креатинфосфокінази переважно міститься у клітинах головного мозку, але невеликі її кількості виявляються в усіх тканинах організму.

Важливим ефектом дії динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти також варто назвати вищезгадану антигіпоксичну активність, пов'язану зі специфічним впливом на енергетичний обмін. Сукцинат, що входить до складу сполуки, є найважливішим компонентом циклу Кребса, оптимізує біоенергетичний потенціал нейронів і підвищує їхню стійкість до гіпоксії, нормалізує енергосинтезуючі функції мітохондрій (Петруша, 2016; Бурчинський, 2021).

Уважаємо, що нейропротекторна дія динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти реалізується, головним чином, завдяки фармакофору – бурштинової кислоти, а також завдяки структурній схожості досліджуваної речовини з вітаміном В₆, який бере участь у синтезі серотоніну («гормону радості») і підтримує антирадикальні властивості багатьох антиоксидантів (каскадне потенціювання). Поєднання солей сукцинату з органічним радикалом полегшує проникнення сполуки крізь біологічні мембрани. При дисоціації або відщепленні сукцинату базова частина молекули інтеркалюється у структуру клітинної мембрани, змінює її фізико-хімічні

властивості, а залишок сукцинату використовується дихальним ансамблем як енергетичний субстрат.

Висновки

Проведені дослідження показали значний нейропротективний вплив динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти на показники ішемічного пошкодження головного мозку в умовах експериментального ГПМК, що проявлялося зменшенням летальності тварин у гострий період експериментальної патології та зменшенням кількості щурів з тяжкою неврологічною симптоматикою в гострий період мозкового інсульту. Динатрієва сіль 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти вірогідно зменшувала кількість парезів, геміпарезів, нормалізувала орієнтовно-дослідницьку діяльність піддослідних тварин. Одним з можливих механізмів нейропротективної дії є здатність цієї сполуки гальмувати окиснювальну модифікацію білкових макромолекул головного мозку та зменшувати ступінь інгібування активності ферментів АО-захисту. Іншим можливим механізмом нейропротективної дії динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти є її здатність активувати біоенергетичні процеси (можливо, завдяки активації компенсаторного сукцинатоксидазного шляху) та зменшувати ішемічне пошкодження нервової тканини. За силою нейропротективного ефекту динатрієва сіль 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти переважає відомий антиоксидант-нейропротектор «Мексидол».

Отже, поєднання нейропротективної, антиоксидантної, антидепресивної й антигіпоксичної дії динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти визначає її можливості як перспективного ефективного нейрометаболического антиоксиданту-церебропротектору.

Подяки

Автор висловлює подяку д.б.н., проф., завідувачу кафедри фармакології та медичної рецептури з курсом нормальної фізіології Запорізького державного медико-фармацевтичного університету І.Ф. Беленічеву за допомогу у проведенні експерименту.

Список використаної літератури

Беленічев І.Ф., Демченко А.В. Порівняльне оцінювання ефективності дії сучасних нейропротекторів в умовах експериментальної хронічної ішемії мозку. *Запорізький медичний журнал*. 2015. № 2 (89). С. 37–41.

Бурчинський С.Г. Стратегія і критерії вибору фармакотерапії початкових порушень мозкового кровообігу у практиці сімейного лікаря. *Ліки України*. 2021. № 5 (251). С. 12–15.

Важнича О.М., Луценко Р.В., Власенко Н.О., Дев'яткіна Н.М. Ефекти сукцинатовмісного препарату та його комбінації з колоїдним інфузійним розчином при експериментальній терапії крововтрати. *Фармакологія та лікарська токсикологія*. 2022. Т. 16. № 1. С. 27–35.

Компанець І.В., Остапченко А.І. Дослідження мембранних білків та ліпідів: навч. посібник (для студентів ННЦ «Інститут біології»). Київ: КНУ ім. Т. Шевченка, 2013. 159 с.

Литвиненко О. С. Нейропротективна активність модуляторів системи глутатіону в умовах моделювання церебральної ішемії: дис. ... канд. біол. наук (доктора філософії): 14.03.05 / Запорізький державний медичний університет МОЗ України. Запоріжжя, 2018. 220 с.

Мехед О.Б., Ткаченко О.В. Математичні методи в біології: методичні рекомендації для студентів природничих спеціальностей. Чернігів : НУЧК, 2020. 93 с.

Остапченко А.І., Компанець І.В., Синельник Т.Б. Біологічні мембрани та основи внутрішньоклітинної сигналізації: методи дослідження: навч. посіб. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2017. 447 с.

Петруша Ю.Ю. Дослідження антидепресивної активності динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти. *Наук. вісн. Східноєвропейського національного університету ім. Лесі Українки. Серія: Біологічні науки*. 2015. № 2 (302). С. 191–194.

Петруша Ю.Ю. Ноотропна та антигіпоксична активність динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти в дослідах *in vivo*. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2016. № 72. С. 187–193.

Пропіл 2-(5-(3,4,5-триметоксифеніл)-1H-1,2,4-триазол-3-ілтіо)ацетамідат, що проявляє нейропротекторну активність: пат. 98871 Україна: МПК (2015.01), C07D 249/00, A61K 31/41 (2006/01). № 21412623; заявл. 24.11.2014; опубл. 12.05.2015, Бюл. № 9. 5 с.

Самелюк Ю.Г. Синтез та дослідження біологічно активних похідних 1,2,4-тріазол-3-тіону, що містять метоксифенільні замісники: дис. ... канд. фарм. наук: 15.00.02 / Запорізький державний медичний університет МОЗ України. Запоріжжя, 2016. 235 с.

Чекман І.С., Беленічев І.Ф., Нагорна О.О., Горчакова Н.О. та ін. Доклінічне вивчення специфічної активності потечійних лікарських засобів первинної та вторинної нейропротекції: методичні рекомендації. Київ: ДП «Державний експертний центр МОЗ України», 2016. 93 с.

Liguori I., Russo G., Curcio F., Bulli G., Aran L., Della-Morte D., Gargiulo G., Testa G., Cacciatore F., Bonaduce D., Abete P. Oxidative stress, aging, and diseases. *Clin Interv Aging*. 2018. V. 13. P. 757–772. <https://doi.org/10.2147/CIA.S158513>

Halliwell B., Gutteridge J. M. Free radicals in biology and medicine. Oxford: Clarendon Press, 1985. 346 p.

Halliwell B. Molecular Biology of free Radicals in Human Diseases. London: St. Lucia: OICA, 1999. 410 p.

Iakovou E., Kourti M.A. Comprehensive Overview of the Complex Role of Oxidative Stress in Aging, The Contributing Environmental Stressors and Emerging Antioxidant Therapeutic Interventions. *Front. Aging Neurosci., Sec. Cellular and Molecular Mechanisms of Brain-aging*. 2022. V. 14. P. 1–29. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2022.827900>

McGrow C.P. Experimental Cerebral Infarction Effects of Pentobarbital in Mongolian Gerbils. *Arch. Neurol.* 1977. V. 34. № 6. P. 334–336. <https://doi.org/10.1001/archneur.1977.00500180028006>

Sekhon M.S., Ainslie P.N., Griesdale D.E. Clinical pathophysiology of hypoxic ischemic brain injury after cardiac arrest: a «two-hit» model. *Crit Care*. 2017. V. 21 (90). P. 1–10. <https://doi.org/10.1186/s13054-017-1670-9>

Zarubin I.V., Lukk M.V., Shabanov P.D. Antihypoxic and Antioxidant Effects of Exogenous Succinic Acid and Aminothiols Succinate-Containing Antihypoxants. *Bulletin of experimental biology and medicine*. 2012. V. 153 (3). P. 336–339. <https://doi.org/10.1007/s10517-012-1709-5>

References (translated & transliterated)

Bjelenichev, I.F., & Demchenko, A.V. (2015). Porivnjajlne ocinjvannja efektyvnosti diji suchasnykh nejroprotektoriv v umovakh eksperymentaljnoji khronichnoji ishemiji mozku [Comparative evaluation of the effectiveness of modern neuroprotectors in conditions of experimental chronic brain ischemia]. *Zaporizhkyj medychnyj zhurnal [Zaporizhzhia Medical Journal]*, 2 (89), 37–41 [in Ukrainian].

Burchynskij, S.Gh. (2021). Strateghija i kryteriji vyboru farmakoterapiji pochatkovykh porushenj mozkovogho krovoobighu u praktyci simejnogho likarja [Strategy and criteria for the selection of pharmacotherapy of initial disorders of cerebral blood circulation in the practice of a family doctor]. *Liky Ukrajinj [Medicines of Ukraine]*, 5(251), 12–15 [in Ukrainian].

Vazhnycha, O.M., Lucenko, R.V., Vlasenko, N.O., & Dev'jatkina, N.M. (2022). Efekty sukcyinatovmisnogo preparatu ta jogho kombinaciji z koloidnym infuzijnym rozchynom pry eksperymentalnij terapiji krovovtraty [Effects of a succinate-containing drug and its combination with a colloidal infusion solution in the experimental therapy of blood loss]. *Farmakologhija ta likarsjka toksykologhija [Pharmacology and medicinal toxicology]*, 16(1), 27–35. <https://doi.org/10.33250/16.01.027> [in Ukrainian].

Kompanecj, I.V., & Ostapchenko, L.I. (2013). Doslidzhennja membrannykh bilkiv ta lipidiv: navch. posibnyk (dlja studentiv NNC «Instytut biologhiji») [Study of membrane proteins and lipids: education. manual (for students of the Institute of Biology)]. Kyjiv: KNU im. T. Shevchenka [in Ukrainian].

Lytvynenko, O.S. (2018). Nejroprotektivna aktyvnistj moduljatoriv systemy ghlutationu v umovakh modeljuvannja cerebraljnoji ishemiji [Neuroprotective activity of modulators of the glutathione system in conditions of simulation of cerebral ischemia]. *Candidate's thesis*. Zaporizhzhja [in Ukrainian].

Mekhed, O.B., & Tkachenko, O.V. (2020). Matematychni metody v biologhiji: metodychni rekomendaciji dlja studentiv pryrodnychykh specialnostej [Mathematical methods in biology: methodological recommendations for students of natural sciences]. Chernighiv: NUChK [in Ukrainian].

Ostapchenko, L.I., Kompanecj, I.V., & Synelnyk, T.B. (2017). Biologhichni membrany ta osnovy vnutrishnjoklitynnoji syghnalizaciji: metody doslidzhennja: navch. posib [Biological membranes and the basics of intracellular signaling: research methods: study guide]. Kyjiv: VPC «Kyjivsjkyj universytet» [in Ukrainian].

Petrusha, Yu.Yu. (2015). Doslidzhennja antydepresyvnoji aktyvnosti dynatrijevoji soli 2-(pyridyn-4-iltio)burshtynovoji kysloty [Study of antidepressant activity of disodium salt 2-(pyridin-4-ylthio)succinic acid]. *Nauk. visn. Skhidnojevrops'kogo nacional'nogho universytetu im. Lesi Ukrajinky. Serija: Biologhichni nauky [Scientific Bulletin of the East European National University named after Lesya Ukrainka. Series: Biological Sciences]*, 2(302), 191–194 [in Ukrainian].

Petrusha, Yu.Yu. (2016). Nootropna ta antyhipoksychna aktyvnistj dynatrijevoji soli 2-(pyridyn-4-iltio)burshtynovoji kysloty v doslidakh in vivo [Nootropic and antihypoxic activity of the disodium salt of 2-(pyridin-4-ylthio)succinic acid in vivo experiments]. *Visnyk Ljvivsjkogho universytetu. Serija biologhichna [Bulletin of Lviv University. Biological series]*, 72, 187–193 [in Ukrainian].

Sameljuk, Yu.Gh., Kaplaushenko, A.Gh., Bjelenichev, I.F., Abramov, A.V., Bukhtiarova, N.V., Morhuntsova, S.A., & Pavlov, S.V. (2015). Syntez ta doslidzhennja biologhichno aktyvnykh pokhidnykh 1,2,4-triazol-3-tionu, shcho mistyat' metoksyfenil'ni zamisnyky: [Synthesis and research of biologically active derivatives of 1,2,4-triazole-3-thione containing methoxyphenyl substituents:]. *Dys. na zdobuttja naukovogho stupenja kandydata farmakologhichnykh nauk Zaporiz'kyy derzhavnyy medychnyy universytet MOZ Ukrayiny. Zaporizhzhya [Dissertation for obtaining the scientific degree of candidate of pharmacological sciences Zaporizhzhia State Medical University, Ministry of Health of Ukraine. Zaporizhzhia] (patent 98871 Ukrajina)* [in Ukrainian].

Chekman, I.S., Bjelenichev, I.F., Naghorna, O.O., Ghorchakova, N.O., Luk'janchuk, V.D., Bukhtiarova, N.V., Ghorbachova, S.V., & Syrova, Gh.O. (2016). Doklinichne vyvchennja specyfichnoji aktyvnosti potecijnykh likarsjkykh zasobiv pervynnoji ta vtorynnoji nejroprotekciji: metodychni rekomendaciji [Preclinical study of the specific activity of potential drugs for primary and secondary neuroprotection: methodological recommendations]. Kyjiv: DP «Derzhavnyj ekspertnyj centr MOZ Ukrayiny» [in Ukrainian].

Liguori, I., Russo, G., Curcio, F., Bulli, G., Aran, L., Della-Morte, D., Gargiulo, G., Testa, G., Cacciatore, F., Bonaduce, D., & Abete, P. (2018). Oxidative stress, aging, and diseases. *Clin Interv Aging*, 13, 757–772. <https://doi.org/10.2147/CIA.S158513> [in English].

Halliwell, B., & Gutteridge, J.M. (1985). *Free radicals in biology and medicine*. Oxford: Clarendon Press [in English].

Halliwell, B. (1999). *Molecular Biology of free Radicals in Human Diseases*. London: St. Lucia: OICA [in English].

Iakovou, E., & Kourti, M.A. (2022). Comprehensive Overview of the Complex Role of Oxidative Stress in Aging, The Contributing Environmental Stressors and Emerging Antioxidant Therapeutic Interventions. *Front. Aging Neurosci., Sec. Cellular and Molecular Mechanisms of Brain-aging*, 14, 1–29. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2022.827900> [in English].

McGrow, C.P. (1977). Experimental Cerebral Infarction Effects of Pentobarbital in Mongolian Gerbils. *Arch. Neurol.*, 34(6), 334–336. <https://doi.org/10.1001/archneur.1977.00500180028006> [in English].

Sekhon, M.S., Ainslie, P.N., & Griesdale, D.E. (2017). Clinical pathophysiology of hypoxic ischemic brain injury after cardiac arrest: a «two-hit» model. *Crit Care*, 21(90), 1–10. <https://doi.org/10.1186/s13054-017-1670-9> [in English].

Zarubin, I.V., Lukk, M.V., & Shabanov, P.D. (2012). Antihypoxic and Antioxidant Effects of Exogenous Succinic Acid and Aminothiols Succinate-Containing Antihypoxants. *Bulletin of experimental biology and medicine*, 153(3), 336–339. <https://doi.org/10.1007/s10517-012-1709-5> [in English].

Отримано: 05.07.2023
Прийнято: 13.10.2023



УДК 577.3+902+543.4+902/904
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.6>

БІОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО ДОСЛІДЖЕННЯ АРХЕОЛОГІЧНИХ АРТЕФАКТІВ ІЗ МІСЦЬ АРХЕОЛОГІЧНИХ РОЗКОПОК НА ПРИКЛАДІ СПЕКТРОСКОПІЧНОГО АНАЛІЗУ БУРИШТИНУ

О. В. Пихова¹, О. Б. Кучменко²

Біофізичні, зокрема спектроскопічні, методи дослідження є інструментами для встановлення складу, вивчення структури та механізмів взаємодії в об'єктах живої та неживої природи. Біофізичні методи нині застосовуються в дослідженні природних конденсованих систем, фазової та міжмолекулярної взаємодії в таких системах, зокрема для дослідження буриштин. Спектральні методи мають перевагу – можливість неруйнівного аналізу речовини, що є важливим, наприклад для археологічних, криміналістичних досліджень, ювелірної справи, де цілісність об'єктів дослідження посідає ключове місце. Так, для цих галузей важливу роль у вивченні об'єктів відіграє FTIR-спектроскопія, завдяки застосуванню якої можна вивчати якісний склад речовин, інтерпретувати отримані результати в контексті датування, встановлення походження матеріалів. Мета роботи – застосування FTIR-спектроскопії для визначення матеріалу виготовлення намистин, які були знайдені у процесі археологічних розкопок, як виробів із буриштин, визначення джерела його походження. Об'єктом дослідження були 4 намистини із Зольника-2 пам'ятки Могриця-Зольники. Для ідентифікації матеріалу виготовлення намистин було використано метод FTIR-спектроскопії порушеного повного внутрішнього відбиття. Наявність у спектрах пропускання речовини характеристичних піків, притаманних органічним компонентам буриштин, дозволила встановити, що всі 4 намистини виготовлені з буриштин, а не зі скла чи рослинних смол інших типів. Під час дослідження типу буриштин визначено, що намистина № 1 виготовлена з балтійського буриштин, намистини № 2 та 3 – з буриштин румунського типу. Висновки зроблені на основі наявності маркерних сполук у буриштині – буриштинової кислоти та її солей. Використання інфрачервоної спектроскопії для ідентифікації буриштин є ефективним неруйнівним методом дослідження буриштин. За допомогою FTIR-спектроскопії вдалось визначити вміст маркерних органічних речовин буриштин в археологічних артефактах та, що більш важливо, визначити ймовірний тип буриштин, з якого виготовлені намистини. Ці результати є підтвердженням важливості застосування біофізичних методів у суміжних дослідженнях. Для

¹ аспірантка кафедри біології
(Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя, м. Ніжин)
e-mail: olga.pykhova@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4078-4714

² доктор біологічних наук, професор,
завідувач кафедри біології
(Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя, м. Ніжин)
e-mail: kuchmenko1978@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3021-8583

археологічних досліджень отримані результати є важливими, бо знахідки виробів із бурштину є рідкістю для пам'яток скіфського часу Лісостепового Лівобережжя, а особливо зольників.

Ключові слова: FTIR-спектроскопія, ATR-спектроскопія, археологічні дослідження, бурштин України, зольники, скіфський час, біогенні компоненти.

BIOLOGICAL APPROACHES TO THE RESEARCH OF ARCHAEOLOGICAL ARTIFACTS FROM ARCHAEOLOGICAL EXCAVATION SITES USING THE SPECTROSCOPIC ANALYSIS OF AMBER

O. V. Pykhova, O. B. Kuchmenko

Biophysical, in particular spectroscopic, research methods are tools for establishing the composition, and studying the structure and mechanisms of interaction in objects of animate and inanimate nature. Biophysical methods are currently used in studying the natural condensed matter, phase, and intermolecular interactions in such systems, particularly for the study of amber. Spectral methods have the advantage of the possibility of non-destructive analysis of the matter, which is important, for example, for archaeological research, and forensics jewelry, where the integrity of the objects of study occupies a key place. Thus, for these industries, FTIR spectroscopy plays an important role in the study of objects, thanks to the use of which it is possible to study the qualitative composition of substances, interpret the results obtained in the context of dating, and establish the origin of materials. The purpose of the work is to use FTIR spectroscopy to determine the material for the manufacture of beads found during archaeological excavations as amber products and to determine the source of their origin. The object of the study was 4 beads from Zolnik-2 sights of Mohrytsya-Zolniki. The FTIR spectroscopy of the disturbed total internal reflection was used to identify the material for the manufacture of beads. The presence in the substance transmission spectra of characteristic peaks inherent in the organic components of amber made it possible to establish that all 4 beads are made of amber, and not of glass, or vegetable resins of other types. In the study of the type of amber, it was determined that bead № 1 is made of Baltic amber, and beads № 2 and № 3 are made of Romanian-type amber. The conclusions are made based on the presence of marker compounds in succinic acid and its salts. The use of infrared spectroscopy to identify amber is an effective non-destructive method for the study of amber. With the help of FTIR spectroscopy, it was possible to determine the content of marker organic matter of amber in archaeological artifacts and, more importantly, to determine the probable type of amber from which the beads are made. These results confirm the importance of applying biophysical methods in related studies. For archaeological research, the results obtained are important, because the invasion of amber products is rare for the monuments of the Scythian time of the Forest-steppe Left Bank, especially ash trees.

Key words: FTIR spectroscopy, ATR spectroscopy, archaeological research, amber of Ukraine, ash trees, Scythian time, biogenic components.

Вступ

Бурштин є природним матеріалом, що утворений із залишків рослинних смол під дією тиску та високої температури. Нині вважається, що цей матеріал походить зі смоли хвойних рослин вимерлих видів родин *Araucariaceae* або *Pinaceae*. Кількість відкладеного в палеогені тільки балтійського бурштину оцінюється як 10^5 тон (Dietz et al., 2013). Це, імовірно, привело до активного використання виробів із бурштину як предметів розкоші. Цей матеріал ще за доби каменю використовувався людьми для виготовлення прикрас і амулетів. Ззовні схожий на натуральний камінь, але набагато м'якший, він легко піддавався механічній обробці, що дозволяло створювати вироби

різної форми та призначення (намиста, елементи оздобу, прясла, фігурки тощо).

За фізичними властивостями бурштин є матеріалом із низькою щільністю, що легко піддається механічній обробці та може бути різного кольору – від світло-жовтого до темно-коричневого. Іноді в ньому консервуються давні організми, що робить його джерелом унікальних біовключень.

Утворювався бурштин за механізмом радикальної полімеризації з великої кількості прекурсорів, основу яких становлять смоли хвойних рослин. Хімічно він є гетерогенною сумішшю макромолекул, мономерами яких є понад 700 різних насичених, ненасичених і ароматичних вуглеводнів, також природних терпенів, карбонових

кислот і похідних від них спиртів. Зокрема, для бурштину характерні такі ароматичні сполуки, як похідні нафталену, антрацену та фенантрени. Хімічний склад бурштину залежить від регіону, де він був утворений, відповідно, і від рослин, які слугували джерелом утворення. Так, для балтійського характерна наявність бурштинової кислоти, її естерифікованої форми та солей – сукцинатів. Саме ці речовини слугують маркерними для визначення приналежності до певної території (Dietz et al., 2013). Окрім джерела рослинної смоли, яка утворила бурштин, важливими є умови консервування та знаходження бурштину. Так, властивість, за якою FTIR-спектроскопія слугує інструментом для дослідження місця походження, є ступінь окиснення речовин бурштину, що дозволяє визначити характеристичні піки пропускання, які відрізняються для бурштинів залежно від походження й умов консервації (Malanchuk et al., 2018).

Залежно від географічного походження та властивостей бурштин поділяють на кілька груп. Так, найбільш розповсюдженими є балтійський (сукцинит), домініканський, сицилійський (симетит), бурштин із Бірми (бурміт), бурштин із Румунських Карпат – романіт. За хімічним складом бурштин класифікують на 5 груп. Група Ia включає найбільшу кількість за масою бурштину – балтійський, у складі якого є бурштинова кислота та її похідні. Той, що належить до класу Ib, не містить сукцинатів, проте збагачений лантаноїдами. Інші групи становлять меншість та не є розповсюдженими в Європі. Більшість європейського бурштину є саме балтійською й утворена зі смоли вимерлої хвойної рослини *Pinus succinifera*, родова назва якої відображає вміст сукцинату у складі матеріалу (Poulin & Helwig, 2014).

В англомовній літературі вживаються терміни «геологічний» і «археологічний» бурштин, що відображають антропогенний вплив на цей матеріал. Так, археологічним називають бурштин, який має сліди обробки та знайдений у культурному шарі археологічних пам'яток. В Україні найдавніші знахідки археологічного бурштину фіксуються на пам'ятках верхнього палеоліту. Спочатку бурштин використовувався локально, у місцях залягання, а в період доби бронзи та раннього заліза став предметом торгівлі й ареал поширення виробів із нього суттєво збільшився. Через широке застосування бурштину як матеріалу для виготовлення

прикрас дослідження його складу та походження є актуальним для реконструкції культурно-історичних процесів.

Для європейського регіону найхарактернішим є бурштин з узбережжя Балтійського моря, що походить від смоли вимерлого виду дерев *Pinus succinifera*. Родовища і, відповідно, знахідки цього бурштину географічно простягаються від Північної Європи до Уралу. Нині балтійський бурштин трапляється в Литві, Латвії, Естонії, Польщі, Росії, а іноді вимивається на береги Данії, Норвегії й Англії. Інші світові джерела бурштину включають М'янму, Ліван, Сицилію, Румунію, Німеччину, Мексику, Домініканську Республіку та Канаду (Dietz et al., 2013). На території України найбільше розповсюдження також має балтійський бурштин. Так, його виходи відомі поблизу Києва, Харкова та на території Волині. Український бурштин має відносно велику глибину залягання, тому освоєння таких джерел почалось досить недавно (Mänd et al., 2018).

За скіфської доби знахідки бурштинових намистин на пам'ятках України досі фіксувалися переважно в похованнях на території Лисостепового Правобережжя (Klochko, 2011). Пояснити їх розповсюдження тут можна тим, що на цій території пролягав відомий Бурштиновий шлях, який активно функціонував упродовж доби бронзи (Klochko, 2011).

Серед методів ідентифікації та дослідження бурштину є більш традиційні інвазійні методи та такі, що є неруйнівними. Для ідентифікації бурштину досліджують його густину, здатність до флуоресценції, розчинність, температуру плавлення тощо. Усі ці дані допомагають відрізнити бурштин від копалу, смоли та синтетичних аналогів. Для встановлення походження бурштину застосовуються інструментальні методи: хроматографія, мас-спектрометрія, ЯМР та інфрачервона спектроскопія. Для проведення ЯМР необхідно використати 30–100 мг зразка, для газової мас-спектрометрії – 1–3 г зразка, що є великою кількістю та потребує фактично руйнування чи знищення археологічного артефакту. Натомість FTIR спектроскопія із застосуванням порушеного повного відбиття є неруйнівним методом, що робить її використання доцільним у разі вивчення археологічних артефактів (Klochko, 2008; Angelini & Bellintani, 2005). Так, застосування інфрачервоної спектроскопії дозволяє визначити приналежність бурштину до

того чи того типу, зокрема, за допомогою цього методу можна розрізнити найпоширеніший у Європі тип бурштину – балтійський. Спектри балтійського бурштину, отримані методом інфрачервоної спектроскопії, містять характеристичні піки в діапазоні від 1160 см^{-1} до 1260 см^{-1} , мають специфічну форму та називаються «балтійське плече». Область під назвою «балтійське плече» пояснюється наявністю естерифікованої бурштинової кислоти та використовується для ідентифікації саме бурштину балтійського походження.

Для археологічних артефактів, що візуально мають вигляд бурштину, першим етапом є ідентифікація матеріалу, з якого вони зроблені. FTIR-спектроскопія дозволяє безпомилково встановити матеріал виготовлення як бурштин та відкинути ймовірні варіанти – скло, штучні полімери. Доцільність використання FTIR у дослідженні географічного походження та можливого джерела сировини артефактів із бурштину пояснюється точністю та чутливістю даного методу.

Метою роботи було застосування FTIR-спектроскопії порушеного повного внутрішнього відбиття для визначення матеріалу виготовлення намистин, які були знайдені у процесі археологічних розкопок, як виробів із бурштину, визначення джерела його походження.

Матеріал і методи

Для дослідження були взяті 4 намистини із Зольника-2 пам'ятки Могриця-Зольники, що розташована на території Сумської області. Намистини були виявлені під час розкопок Археологічної експедиції Національного університету «Києво-Могилянська академія» у 2021 р. в результаті просіювання культурного шару пам'ятки. Наявні матеріали дозволяють попередньо датувати зольник кінцем VI ст. до н.е.

Зольники – це курганоподібні насипи до 3 м заввишки, які характеризуються значною насиченістю культурного шару керамікою та побутовими відходами та золою. Вони не належать ані до поховальних, ані до поселенських пам'яток, імовірно, являють собою культові споруди. Дотепер їхнє функціональне призначення точно не відоме. Ця категорія об'єктів виявлена на території басейну Псла не так давно, тому є новою для археології цієї території (Білінський і Кабанов, 2015).

Для спектроскопічних досліджень використовували інфрачервоний спектрометр

фірми «Shimadzu» (Японія, IRAffinity-1S із приставкою The Quest Single Reflection ATR Accessory P/NGS10800). Діапазон вимірювання $4\ 000\text{--}400\text{ см}^{-1}$, роздільна здатність 4 см^{-1} . Бурштин є оптично гетерогенним середовищем. Для нівелювання ефекту неоднорідного розсіювання світла гетерогенною системою було застосовано модель Кубелка – Мунк для дифузного поширення світла. Модель Кубелка – Мунк є однією з моделей для опису проходження світла в неоднорідному середовищі та застосовується для пористих чи гетерогенних середовищ. Обробка спектральних даних під час проведення аналізу властивостей пропускання світла для таких середовищ проблематична через розсіювання світла, що спричинює послаблення чи зникнення деяких смуг у спектрах. У даній моделі особливості поширення світла через неоднорідні середовища нівелюються за допомогою введення коефіцієнта розсіювання – s і обробки спектрів за допомогою функції Кубелка – Мунк (Abdullahi et al., 2016).

Бурштин є гетерогенним матеріалом також на молекулярному рівні, для нього характерні варіації в кількісному складі в різних частинах твердого зразка. Для уникнення помилок в інтерпретації спектрів було знято по 20 спектрів із кожної намистини з різних частин намистин. Для кожного спектра було визначено характеристичні піки, інтерпретація проводилась з урахуванням усіх отриманих результатів, у роботі наведено приклади отриманих спектрів.

Результати

У результаті роботи було отримано низку спектрів пропускання археологічних артефактів – намистин. Першим завданням була ідентифікація наявних намистин як бурштину, зокрема розрізнення бурштину від скла.

За наявними характеристичними піками, що притаманні бурштину, було встановлено приналежність усіх чотирьох намистин до бурштинових виробів. Так, у спектрах пропускання було отримано характерні піки за $3\ 450\text{ см}^{-1}$, що притаманні бурштиновій кислоті в матеріалі (рис. 1). Окрім того, в отриманих спектрах були наявні піки поглинання за $1\ 250\text{ см}^{-1}$ та $1\ 155\text{ см}^{-1}$, для яких є специфічна назва – «балтійське плече». Саме ця ознака притаманна бурштину балтійського походження.

Початковим завданням була ідентифікація намистин як виробів із бурштину та від-

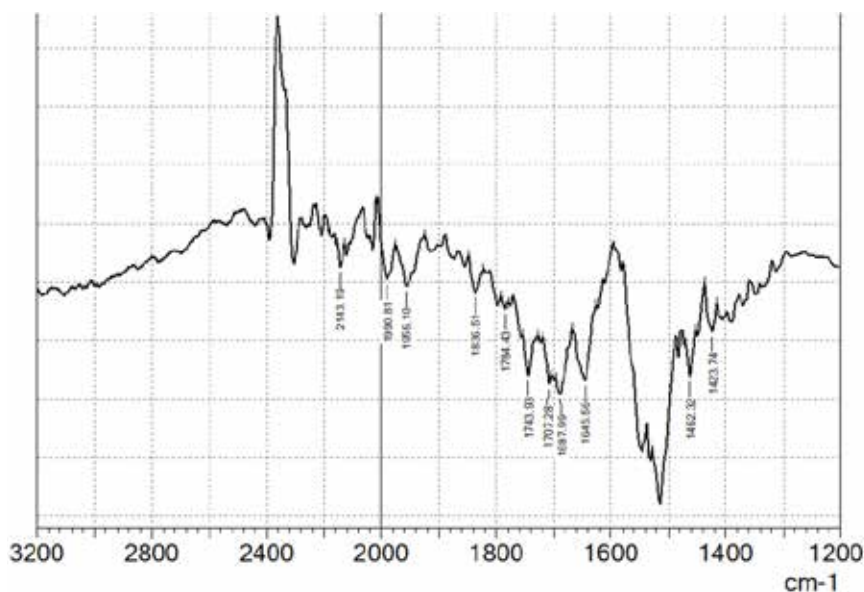


Рис. 1. FT-IR спектр пропускання для зразка № 2

сікання скла як матеріалу виготовлення. Для скла характерна наявність меншої кількості характеристичних піків, найінтенсивніший із яких для діапазону $4\ 000\text{--}1\ 100\ \text{cm}^{-1}$ припадає на $3\ 436\ \text{cm}^{-1}$. Оскільки скло є матеріалом мінеральної природи, то характерна область поглинання лежить у діапазоні від $1\ 100\ \text{cm}^{-1}$ до $500\ \text{cm}^{-1}$. У результаті порівняння отриманих спектрів зі спектрами скла можна дійти висновку, що дані артефакти не є виробами зі скла (Odriozola et al., 2019).

Обговорення

У спектрах, отриманих зі зразків бурштинових намистин, було ідентифіковано піки, що відповідають частотним коливанням $\text{C}=\text{C}$ і $\text{C}=\text{O}$ зв'язків у ланцюгах карбонових кислот. Також пік $1\ 600\text{--}1\ 604\ \text{cm}^{-1}$, що відповідає коливанню COO^- в молекулах ненасичених карбонових кислот. Піки за $1\ 664\ \text{cm}^{-1}$ та $1\ 687\ \text{cm}^{-1}$ можуть свідчити про наявність абіетинової кислоти – ароматичної одноосновної карбонової кислоти, що притаманна викопним бурштинам, зокрема й археологічним. В отриманих спектрах бурштину також було ідентифіковано піки за $1\ 514\ \text{cm}^{-1}$, що відповідають розтягуванню $\text{C}=\text{C}$, і пік за $1\ 383\ \text{cm}^{-1}$, що відповідає деформаційним коливанням $\text{C}-\text{H}$. Піки за $1\ 547\text{--}1\ 423\ \text{cm}^{-1}$, що були ідентифіковані на спектрах пропускання досліджуваного бурштину, є специфічними для карбонових і гідроксокислот і притаманні саме румунського бурштину. Водночас піки, що відповідають тим же молекулярним структурам для балтійського бурштину, зсунуті в діапазон $1\ 547\text{--}1\ 300\ \text{cm}^{-1}$. Піки за $1\ 458$

і $1\ 385\ \text{cm}^{-1}$, що було ідентифіковано у спектрах пропускання бурштину, відповідають деформаційним коливанням метиленової та метильної груп. Також для бурштину характерна наявність у складі терпенів і дитерпенів (табл. 1). Так, в отриманих спектрах пропускання зразків бурштину було встановлено наявність деформаційних коливань за $2\ 860\ \text{cm}^{-1}$ і $2\ 933\ \text{cm}^{-1}$ (Gough & Mills, 1972).

Отже, візуальне дослідження й аналіз отриманих спектрів пропускання дозволили встановити, що всі чотири намистини належать до матеріалу органічного походження, а саме бурштину.

Після визначення приналежності матеріалу, з якого виготовлені намистини, до бурштину, наступним завданням було визначення ймовірного місця походження сировини. Саме для території Європи найхарактернішим є бурштин з узбережжя Балтійського моря, що походить від смоли вимерлого виду дерев *Pinus succinifera*. На території Європи, особливо Румунії та прилеглих до Карпат регіонів, знаходять вироби з романіту – румунського бурштину. Для бурштинових артефактів, знайдених на території України, імовірно, характерна приналежність до балтійського або румунського типів бурштину. Методом інфрачервоної спектроскопії можна розрізнити ці два типи бурштинів. У діапазоні $4\ 000\text{--}3\ 000\ \text{cm}^{-1}$ відсутні значимі відмінності між романським і балтійським бурштином, проте ця область спектра має значення для інтерпретації геологічних зразків бурштину. Головною від-

Таблиця 1

Характеристичні частоти ІЧ поглинання зразків бурштину

1 664 cm^{-1}	Розтягування C = C у молекулах абієтинової кислоти.
1 687 cm^{-1}	Розтягування C = C у молекулах абієтинової кислоти.
1 645 cm^{-1}	Розтягування C = C у молекулах ізопімарової кислоти й абієтинової кислоти у смолах <i>Pinus halepensis</i> .
1 684–1 600 cm^{-1}	Коливання, що відповідають зв'язкам C = C, C = O. Деформаційні коливання C – H – C. Коливання COO ⁻ ненасичених карбонових кислот.
1 514 cm^{-1}	C = C розтягування.
1 383 cm^{-1}	Деформаційні коливання C – H.
2 652, 2 534 cm^{-1}	Розтягування C – H.
1 547–1 423 cm^{-1}	Піки, специфічні для карбоксильних і гідроксокислот. Пік, специфічний для румунського бурштину.
1 547–1 300 cm^{-1}	Піки, специфічні для карбоксильних і гідроксокислот. Пік, специфічний для балтійського бурштину.
2 550 і 2 702 cm^{-1}	Піки, характерні для розтягування карбоксильних груп.
1 450 і 1 355 cm^{-1}	Розтягнення C – H у метильних і метиленових групах у структурі аліфатичних карбонових кислот.
2 870 і 2,930 cm^{-1}	Розтягнення C – H у метильних і метиленових групах ароматичних кілець у структурі дитерпенів.

мінністю між спектрами FTIR балтійського та румунського бурштину є наявність характеристичних піків за 1 250–1 060 cm^{-1} , що мають назву «балтійське плече», наявність яких характерна для балтійського бурштину. Для румунського бурштину пік має іншу форму, а його максимум зміщений до приблизно 1 045–1 020 cm^{-1} (Litescu et al., 2012; Varbu et al., 2010).

Важливою рисою спектрів FTIR бурштинів є наявність характеристичних піків в області 900–600 cm^{-1} . У цьому регіоні можуть бути два типи піків, залежно від віку та походження матеріалу. Так, відсутність різко виражених піків у цій області або відсутність подвійного піку в області 667 cm^{-1} характерна для більш давнього бурштину – балтійського. Для румунського бурштину характерна наявність широкого піку з максимумом, що припадає на 1 045 cm^{-1} , що зберігається і за деконволюції спектра (Odrizola et al., 2019). Для більш молодих бурштинів, зокрема романіту, характерна більша кількість внутрішньомолекулярних зв'язків, як-от зв'язані -ОН групи, що зумовлюють зсув максимуму піку на 1 595 cm^{-1} , порівняно з балтійським, де максимум піку припадає на 1 640 cm^{-1} .

Бурштин – оптично неоднорідне середовище, яке також може містити різноманітні вклучення. Різниця між спектрами того самого зразка може проявлятися в області, що належить до коливань метильної групи та метиленової ланки. На спектрах це проявляється коливанням інтенсивності піків

за 2 962–2 850 cm^{-1} та у специфічних для групи CH_3 коливаннях за 1 375 cm^{-1} .

У результаті дослідження намистин із бурштину для намистини № 1 була встановлена приналежність її до балтійського бурштину. Так, під час оброблення спектрів намистини із бурштину була встановлена наявність характерних піків – «балтійського плеча» – за 1 145 cm^{-1} (рис. 2). Для порівняння наведено спектр поглинання для намистини № 2, який не містить характерного «балтійського плеча».

Для бурштинових намистин № 2 та № 3 було отримано низку спектрів із піками, характерними для романіту. Так, для намистин № 2 та № 3 характерна відсутність «балтійського плеча», у них наявні подвійні піки за 670–700 cm^{-1} . Також для зразків № 2 та № 3 встановлено наявність піків за 1 775 cm^{-1} , 1 753–1 760 cm^{-1} , подвійного піку за 1 510–1 560 cm^{-1} та 865 cm^{-1} , що притаманні саме румунському бурштину (Varbu et al., 2010).

Наявність серед зразків намистин румунського типу бурштину потребує додаткових досліджень. Якщо наявність балтійського типу бурштину є очікуваним результатом, то для румунського типу бурштину результати є непередбачуваними, тому потребують подальших досліджень із застосуванням фізико-хімічних методів і мас-спектрометрії. Подальше дослідження, підтвердження чи уточнення результатів є переважно інвазійним, тобто потребує руйнування артефактів. На етапі первинних досліджень

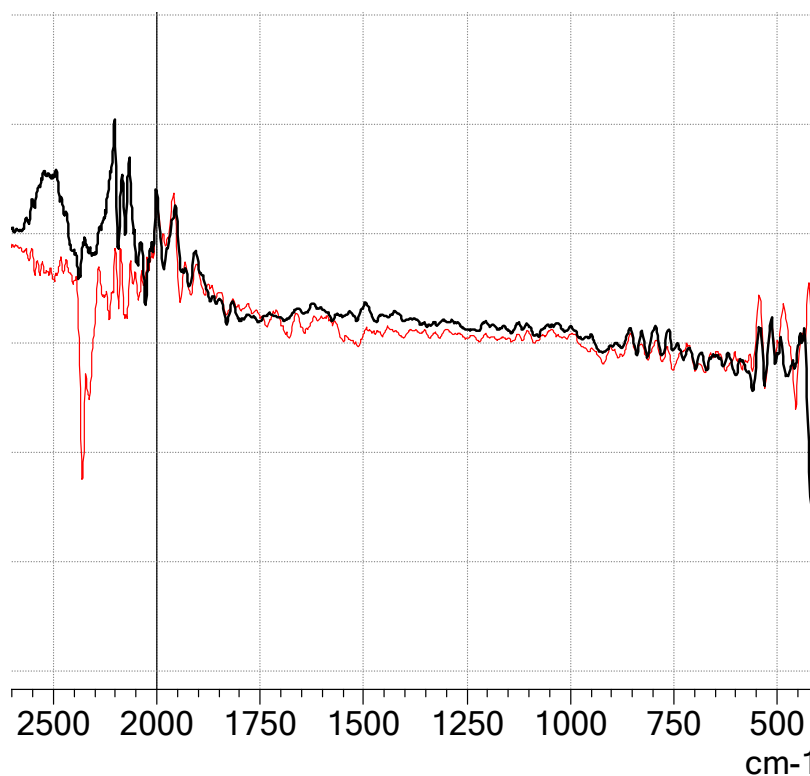


Рис. 2. FTIR-спектри пропускання бурштинових намистин № 1 (чорна лінія) і № 2 (червона лінія)

саме FTIR-спектроскопія як неруйнівний метод є зручним та інформативним

Висновки

Використання інфрачервоної спектроскопії є потужним біофізичним інструментом для дослідження якісного та кількісного складу матеріалів, природних і штучних речовин, міжмолекулярної взаємодії тощо. Так, чутливість і точність цього методу дозволили ідентифікувати матеріал виготовлення для досліджуваних археологічних артефактів і встановити біохімічні особливості складу бурштину. Тому використання FTIR-спектроскопії є перспективним методом у галузі археології, що в українських дослідженнях активно розвивається. Використання інфрачервоної спектроскопії порушеного повного внутрішнього відбиття в даній роботі дозволило виконати неруйнівний аналіз біохімічного складу та визначити маркерні сполуки для бурштину.

Важливо, що знаходження виробів із бурштину є рідкістю для пам'яток скіфського часу Лисостепоного Лівобережжя, а особливо зольників, тому отримані результати не тільки важливі для демонстрації мультидисциплінарного підходу, а і мають практичне значення для археологічних досліджень.

У результаті роботи методом FTIR-спектроскопії проаналізовано 4 бурштинові намистини з місць археологічних розкопок. Установлено, що намистина № 1 виготовлена з балтійського бурштину, що маніфестується наявністю бурштинової кислоти у складі, намистини № 2 та № 3 – з румунського. Для намистини № 4 тип бурштину встановити не вдалось. Імовірно, це пов'язано з нерівною поверхнею та пошкодженнями виробу, що не дозволила отримати якісні спектри пропускання із застосуванням методу порушеного повного відбиття. Можливо, використання подрібненого зразка дозволить отримати спектри пропускання для такого об'єкта, хоча цей підхід передбачає руйнування артефакту.

Не менш важливим було визначення типу бурштину, з якого були виготовлені намистини. За допомогою FTIR-спектроскопії встановлено їх приналежність до балтійської та румунської груп. Наявність бурштину-сукциніту була очікуваною. Намистини, знайдені на пам'ятках скіфського часу, виготовлялися переважно саме з нього. І його наявність пояснюється функціонуванням за доби бронзи торгового шляху, про який ішлося вище. Так само не можна виключати, що якась кількість виробів із

бурштину, який давнє населення збирало на берегах Дніпра та його притоків, що належить до тієї ж Балтійської групи. Що стосується виявленого бурштину-романіту, то шляхи його потрапляння на пам'ятку будуть досліджуватися в майбутньому.

Зважаючи на те, що опублікованих результатів спектроскопічних досліджень бурштинових виробів зі скіфських пам'яток не так багато, це дослідження можна вважати актуальним загалом для скіфології. Беручи до уваги неінвазивність залученого методу, що є беззаперечним пріоритетом у роботі з археологічними матеріалами, подальші міждисциплінарні дослідження є надзвичайно перспективними.

Окрім того, дослідження фізико-хімічних і оптичних властивостей українських бурштинів може бути корисним не лише для археології, історії, ювелірної справи, і для фундаментальних досліджень із таксономії. Так, дослідження біохімічного складу викопних смол є ефективним інструментом у сфері палеобіології (Wolfe et al., 2009). Тому перспективами подальших досліджень є вивчення археологічних артефактів із бурштину з інших пам'яток і колекцій, а також формування бази даних археологічного та геологічного бурштину України, а застосування FTIR-спектроскопії для цього є необхідним інструментом.

Список використаної літератури

- Білинський О.О., Кабанов Д.О. Пам'ятки скіфського часу у верхів'ях Псла. *Археологія і давня історія України*. 2015. Вип. 4 (17). С. 122–127.
- Abdullahi S.S., Güner S., Musa Y.K.I.M., Adamu B.I., Abdulhamid M.I. Simple method for the determination of band gap of a nanopowdered sample using Kubelka Munk theory. *NAMP J.* 2016. 35. P. 241–246.
- Angelini I., Bellintani P. Archaeological ambers from northern Italy: an FTIR-drift study of provenance by comparison with the geological amber database. *Archaeometry*. 2005. 47 (2). P. 441–454. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2005.00212.x>.
- Barbu O.H., Teodor E.D., Virgolici M., Manea M.M., Petroviciu I., Teodor E.S. Romanian Archaeological Amber Artefacts Characterisation Using Vibrational Spectroscopy and Multivariate Data Analysis. *Application of Multivariate Analysis and Chemometry to Cultural Heritage and Environment 3rd ed.*, Taormina, Sicily island, Italy, Europe, 26-29 September 2010 [Електронний ресурс]. URL: <http://surl.li/mlvbg> (дата звернення 12.05.2023)
- Dietz C., Catanzariti G., Quintero S., Jimeno A. Roman Amber Identified as Siegburgite. *Archaeological and Anthropological Sciences*. 2013. 6 (1). P. 63–72. <https://doi.org/10.1007/s12520-013-0129-4>.
- Gough L.J., Mills J.S. The Composition of Succinite (Baltic Amber). *Nature*. 1972. 239 (5374). P. 527–528. <https://doi.org/10.1038/239527a0>.
- Klochko L.S. Amber in the clothing of the population of Scythia. *Міędzy Bałtykiem a Morzem Czarnym. Szlaki międzymorza: IV–I tys. przed Chr.* 2011. 4. P. 161–173.
- Klochko V.I. Bug-Bog trade route. *Na pograniczu światów. Studia z praziejówmiędzymorza bałtycko-pontyjskiego ofiarowane Profesorowi Aleksandrowi Koško*. 2008. 60. P. 239–249.
- Litescu S.-C., Teodor E.D., Truica G.-I., Tache A., Radu G.-L. Fourier Transform Infrared Spectroscopy - Useful Analytical Tool for Non-Destructive Analysis, Infrared Spectroscopy – *Materials Science, Engineering and Technology, Prof. Theophanides Theophile (Ed.)*. 2012. [Electronic resource] URL: <http://surl.li/mlxxg> (access date 15.06.2023).
- Malanchuk Z., Moshynskyi V., Malanchuk Y., Korniienko V. Physico-mechanical and chemical characteristics of amber. *Solid State Phenomena*. 2018. 277. P. 80–89. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.80>.
- Mänd K., Muehlenbachs K., McKellar R., Wolfe A.P. Distinct Origins for Rovno and Baltic Ambers: Evidence from Carbon and Hydrogen Stable Isotopes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2018. 505. P. 265–273. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.06.004>.
- Odriozola C.P., Garrido Cordero J.Á., Daura J., Sanz M., Martínez-Blanes J.M., Avilés M.Á. Amber imitation? Two unusual cases of Pinus resin-coated beads in Iberian Late Prehistory (3rd and 2nd millennia BC). *PLoS ONE*. 2019. 14(5). P. e0215469. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215469>.
- Poulin J., Helwig K. Inside Amber: The Structural Role of Succinic Acid in Class Ia and Class Id Resinite. *Analytical Chemistry*. 2014. 86 (15). P. 7428–7435. <https://doi.org/10.1021/ac501073k>.

Wolfe A.P., Tappert R., Muehlenbachs K., Boudreau M., McKellar R.C., Basinger J.F., Garrett A.A. New Proposal Concerning the Botanical Origin of Baltic Amber. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2009. 276 (1672). P. 3403–3412. <https://doi.org/10.1098/rspb.2009.0806>.

References (translated & transliterated)

Bilynskyi, O., & Kabanov, D. (2015). Pamiatky skifskoho chasu u verkhiviakh Psla [Scythian Time Sites on the Upper Psel]. *Arkheolohiia i davnia istoriia Ukrainy [Archeology and ancient history of Ukraine]*, 4 (17), 122-127 [in Ukrainian].

Abdullahi, S.S., Güner, S., Musa, Y.K.I.M., Adamu, B.I., & Abdulhamid, M.I. (2016). Simple method for the determination of band gap of a nanopowdered sample using Kubelka Munk theory. *NAMP J*, 35, 241-246 [in English].

Angelini, I., & Bellintani, P. (2005). Archaeological ambers from northern Italy: an FTIR-drift study of provenance by comparison with the geological amber database. *Archaeometry*, 47 (2), 441–454. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2005.00212.x> [in English].

Barbu, O.H., Teodor, E.D., Virgolici, M., Manea, M.M., Petroviciu, I., & Teodor, E.S. (2010). Romanian Archaeological Amber Artefacts Characterisation Using Vibrational Spectroscopy and Multivariate Data Analysis. *Application of Multivariate Analysis and Chemometry to Cultural Heritage and Environment 3rd ed.*, Taormina, Sicily island, Italy, Europe, 26-29 September 2010. [Electronic resource] URL: <http://surl.li/mlvbg> (access date 12.05.2023) [in English].

Dietz, C., Catanzariti, G., Quintero, S., & Jimeno, A. (2013). Roman Amber Identified as Siegburgite. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 6 (1), 63–72. <https://doi.org/10.1007/s12520-013-0129-4> [in English].

Gough, L.J., & Mills, J.S. (1972). The Composition of Succinite (Baltic Amber). *Nature*. 239 (5374), 527–528. <https://doi.org/10.1038/239527a0> [in English].

Klochko, L.S. (2011). Amber in the clothing of the population of Scythia. *Między Baltykiem a Morzem Czarnym. Szlaki międzymorza: IV—I tys. przed Chr.*, 161–173 [in English].

Klochko, V.I. (2008). Bug-Bog trade route. *Na pograniczu światów. Studia z praziejówmiędzymorza baltycko-pontyjskiego ofiarowane Profesorowi Aleksandrowi Koško*, 239–249 [in English].

Litescu S.-C., Teodor E.D., Truica G.-I., Tache A., & Radu G.-L. (2012). Fourier Transform Infrared Spectroscopy - Useful Analytical Tool for Non-Destructive Analysis, *Infrared Spectroscopy – Materials Science, Engineering and Technology, Prof. Theophanides Theophile (Ed.)*. [Electronic resource] URL: <http://surl.li/mlxxg> (access date 15.06.2023) [in English].

Malanchuk, Z., Moshynskyi, V., Malanchuk, Y., & Korniienko, V. (2018). Physico-mechanical and chemical characteristics of amber. *Solid State Phenomena*, 277, 80–89. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.80> [in English].

Mänd, K., Muehlenbachs, K., McKellar, R., & Wolfe, A.P. (2018). Distinct Origins for Rovno and Baltic Ambers: Evidence from Carbon and Hydrogen Stable Isotopes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 505, 265–273. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.06.004> [in English].

Odriozola, C.P., Garrido Cordero, J.Á., Daura, J., Sanz, M., Martínez-Blanes, J.M., & Avilés, M.Á. (2019). Amber imitation? Two unusual cases of Pinus resin-coated beads in Iberian Late Prehistory (3rd and 2nd millennia BC). *PLoS ONE*, 14(5), e0215469. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215469> [in English].

Poulin, J., & Helwig, K. (2014). Inside Amber: The Structural Role of Succinic Acid in Class Ia and Class Id Resinite. *Analytical Chemistry*, 86 (15), 7428–7435. <https://doi.org/10.1021/ac501073k> [in English].

Wolfe, A.P., Tappert, R., Muehlenbachs, K., Boudreau, M., McKellar, R.C., Basinger, J.F., & Garrett, A.A. (2014). New Proposal Concerning the Botanical Origin of Baltic Amber. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 276 (1672), 3403–3412. <https://doi.org/10.1098/rspb.2009.0806> [in English].

Отримано: 03.08.2023
Прийнято: 23.10.2023



ГЕОГРАФІЯ

УДК 574.6+574.5

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.7>

ДИНАМІКА РОСЛИННОСТІ СУХОДОЛУ НА ТЕРИТОРІЇ КАР'ЄРІВ ЯК МОДЕЛЬ ПОСТМІЛІТАРНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ДИКОЇ ПРИРОДИ

І. В. Хом'як¹, А. А. Брень², О. В. Медвідь³, А. К. Хом'як⁴, І. Ю. Максименко⁵

*Стаття присвячена пошуку підходів до прогнозування відновлення природної рослинності сухо-
долу на територіях, що постраждали від ведення військових дій. Масштаби військових дій
на території України є причиною появи великих площ території, рослинний покрив яких був
помітно порушений. Після деокупації цих територій актуальним стає питання відновлення
природної рослинності та рекультивзації. Натепер у нас дуже мало даних про такі типи пост-
мілітарних впливів на довкілля. Це спричинить низку проблем під час відновлення рослинного
покриву. Щоб максимально підвищити ефективність повоєнного відновлення природи, необхідно
підібрати найбільш відповідні моделі. Одним із підходів є розроблення прогностичних алгоритмів
відновлення рослинності на основі моделей автогенних сукцесій у районі, де ведеться видобування
корисних копалин відкритим способом. Метою дослідження є побудова прогностичних алгорит-
мів відновлення постмілітарних екосистем на основі моделей динаміки рослинності в районі
піщаних кар'єрів. Відповідно до мети поставлено такі завдання: визначити фітоценотичний
склад рослинності на території піщаних кар'єрів; визначити основні напрями динаміки розвитку*

¹ кандидат біологічних наук,
доцент кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: khomyakivan@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0080-0019

² студентка кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: angelina089brn@gmail.com
ORCID: 0009-0001-6999-394X

³ аспірант, асистент кафедри екології та природоохоронних технологій
(Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир)
e-mail: eko-mb@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-2368-712X

⁴ студентка кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: homiak192003@gmail.com
ORCID: 0009-0002-0486-2014

⁵ аспірант, асистент кафедри екології та природоохоронних технологій
(Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир)
e-mail: ke_miyu@ztu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-3240-8719

рослинності на території піщаних кар'єрів; розробити прогностичні алгоритми відновлення рослинності, порушеної військовими діями. Матеріалами дослідження є повні геоботанічні описи, зроблені загальноприйнятими методами: маршрутно-експедиційними, напівстаціонарними та стаціонарними, у період із 2004 до 2022 року. Нами було встановлено, що динаміка відновлення рослинності залежить від властивостей едафотопу і не залежить від способу його руйнування. Ключовими характеристиками едафотопу, які впливають на темпи та вектори динаміки, є розміри його часточок, рівень зволоженості, кількість елементів мінерального живлення, сусідство з певними типами фітоценозів, наявність водонепроникного шару, банку насіння, антропогенного тиску. Оскільки темпи та вектори відновлення рослинності не залежать від способу порушення її цілісності, то для прогнозів постмілітарного відновлення масивів дикої природи можна використовувати моделі динаміки рослинних угруповань у районі гірничих виробітків відкритого типу.

Ключові слова: екосистеми, природна динаміка, вектори та темпи динаміки. антропогенна трансформація.

DYNAMICS OF TERRESTRIAL VEGETATION ON THE TERRITORY OF QUARRIES AS A MODEL OF POST-MILITARY RESTORATION OF WILD NATURE

I. V. Khomiak, A. L. Bren, O. V. Medvid, A. K. Khomiak, I. Yu. Maksymenko

The article is devoted to the search for approaches to forecasting the restoration of the natural vegetation of the territories affected by military operations. The scale of military operations on the territory of Ukraine is the cause of large areas of territory, the vegetation cover of which was noticeably disturbed. After the de-occupation of these territories, the issue of restoration of natural vegetation and reclamation became actuality. To date, we have not enough information about these types of post-military environmental impacts. This will cause a number of problems during the restoration of the vegetation cover. In order to maximize the effectiveness of the post-war restoration of nature, it is necessary to choose the most appropriate models. One of the approaches is the development of prognostic algorithms for vegetation restoration based on models of autogenic successions in the area where open-pit mining is conducted. The purpose of the study is to build prognostic algorithms for the restoration of post-military ecosystems based on models of vegetation dynamics in the area of sand quarries. In accordance with the goal, the following tasks were set: to determine the phytocenotic composition of vegetation on the territory of sand quarries; determine the main directions of the dynamics of vegetation development on the territory of sand quarries; to develop prognostic algorithms for the restoration of vegetation disturbed by military actions. The materials of the study are complete geobotanical descriptions made by generally accepted route-expedition, semi-stationary, and stationary methods in the period from 2004 to 2022. We established that the dynamics of vegetation restoration depends on the properties of the edaphotope and does not depend on the method of its destruction. The key characteristics of the edaphotope that affect the rate and vectors of dynamics are the size of its particles, the level of moisture, the number of elements of mineral nutrition, the neighborhood with certain types of phytocenoses, the presence of a waterproof layer, seed bank, anthropogenic pressure. Since the rates and vectors of vegetation recovery do not depend on the method of violation of its integrity, models of the dynamics of plant communities in the area of open-pit mining can be used to forecast the post-military recovery of wild nature.

Key words: ecosystems, natural dynamics, vectors, and rates of dynamics. anthropogenic transformation.

Вступ

Історія кожної науки супроводжується гострими дискусіями навколо окремих її теоретичних положень. Ці дискусії виникають із двох причин: світоглядної та теоретичної. У першому випадку наукова концепція відкидається через конфлікт із світоглядом, побудованим за межами наукових досліджень. Таке частіше за все буває на ранніх

етапах розвитку науки. У другому ж це відбувається тоді, коли теорія ще не зміцнилася належною кількістю доказів, демонструючи їхню повторюваність і відтворюваність. Незважаючи на більш як сторічний історичний шлях екології, навколо її теоретичних і прикладних проблем точаться дискусії двох типів. Причина в тому, що екологія набула наприкінці ХХ ст. великої популярності. Це

призвело до того, що вона обросла псевдо-експертним середовищем, яке потужніше за наукову спільноту впливає на суспільну свідомість і формує екологічний світогляд. Тому коли йдеться про відновлення природи на територіях, що постраждали від війни, дискусії частіше точаться не через наукові теорії, а через конфлікт світоглядів та інтересів. Це неприпустимо, тому що відхилення від наукового підходу в умовах глобальної екологічної кризи реально загрожує виживанню людства.

Натепер дискусія навколо відновлення постмілітарних ландшафтів – це розгляд питання з різних світоглядних позицій, а не з конкуруючих екологічних теорій (Hourdequin & Havlick, 2011). Одні є прихильниками рекультиваци та вимагають повернення виробничого потенціалу території (сільськогосподарського чи лісотехнічного). Водночас вони цілковито ігнорують цінність екосистемних послуг. Другі вимагають застосування на цих територіях режиму строгої заповідності. Ці люди живуть в ілюзії про те, що досить обмежити діяльність людини і природа сама собою відновиться до екосистем із найвищим рівнем екосозологічної цінності чи кількості екосистемних послуг. Вони ігнорують дослідження в галузі теорії динаміки екосистем і досвід упровадження режиму строгої заповідності на об'єктах ПЗФ. Третя категорія обстоює науковий підхід, коли на основі проведених досліджень та поширених екологічних теорій будуються прогнози різної ймовірності. Останній підхід є науковим, надійним і найбільш ефективним (More et al., 2009).

Постмілітарні порушення екосистем вивчалися на прикладах військових полігонів або там, де бойові дії проводилися кілька десятиліть тому (Alpatova et al., 2022). В Україні налічується три природні зони та дві гірські країни. Досліджень щодо цих територій і в масштабах, які відповідають інтенсивності бойових дій, не проводилось. Отже, нам потрібно обирати модельні території, на основі досліджень яких будувати свої прогностичні алгоритми (Jacobson & Magynowski, 1998; Хом'як, 2018). Найкращими дослідницькими полігонами є постмайнінгові території (Atiyeh et al., 2007). Особливо там, де порушення стосуються рихлих осадових порід. Отже, найкращим полігоном для моделювання постмілітарного відновлення рослинності є піщані кар'єри (Hagen et al., 2022).

Метою дослідження є побудова прогностичних алгоритмів відновлення постмілітарних екосистем на основі моделей динаміки рослинності в районі піщаних кар'єрів.

Відповідно до мети поставлено такі завдання:

- визначити фітоценотичний склад рослинності на території піщаних кар'єрів;
- визначити основні напрями динаміки розвитку рослинності на території піщаних кар'єрів;
- розробити прогностичні алгоритми відновлення рослинності, порушеної військовими діями.

Матеріал і методи

Матеріалами дослідження є повні геоботанічні описи, зроблені загальноприйнятими методами: маршрутно-експедиційними, напівстаціонарними та стаціонарними. У період із 2004 до 2022 р. було обстежено 22 покинутих і діючих кар'єрів.

База даних геоботанічних описів була створена за допомогою програми "Turboveg for Windows 2.0" (Hennekens, 2009). Назви рослинних угруповань наводяться згідно із продромусом рослинності України (Продромус ..., 2019) за класифікацією Браун – Бланке (Westhoff & Maarel, 1973). Показники чинників середовища, показник динаміки й інтегрований показник антропогенної трансформації визначалися з використанням синфітоіндикаційної методики. Для чинників середовища застосовувалась база даних з уніфікованою шкалою Дідуха – Плюти (Didukh, 2012). Антропогенний тиск визначався за базою даних "EcoDBase 5d" з використанням 18-бальної шкали Дідуха – Хом'яка (Didukh & Khomiak, 2007). Показник природної динаміки визначався за 21-бальною шкалою, розробленою лабораторією «Теорії екосистем» (Khomiak et al., 2019). Обрахунок синфітоіндикаційних показників здійснювався за допомогою Simagrl 1.12 (Хом'як та ін., 2020).

Результати та обговорення

Заселення порушеної поверхні ґрунту відбувається водночас за кількома стратегіями. Залежно від умов середовища, ми можемо спостерігати одну з них або комбінацію декількох. Це різні форми екстремофільних стратегій, використання насінневої діаспори та банку насіння, заселення сегетальною рослинністю або рух кореневищних рудералів (Тимченко і Хом'як, 2019). На першому етапі заселення порушеного екотопу спробу стартувати здійснюють види всіх стратегій, однак надалі відбувається добір

найбільш ефективних у конкретних умовах середовища (Хом'як та ін., 2021).

Практично завжди на порушені субстрати потрапляють наземні водорості та ціанобактерії. Однак темпи їх розмноження настільки низькі, що вони стають помітними неозброєному оку лише за декілька років. Такі організми домінують серед продуцентів території, якщо групи багатоклітинних організмів не повинні створити суцільного рослинного покриву. Якщо суцільний рослинний покрив створено, то вони зменшують у своєму екологічному складі частку епілітних видів і збільшують частку епіфітних. Основним продуцентом одноклітинні або колоніальні водорості залишаються, за умов часткового затінення та помірного зволоження субстрату. Це зазвичай види родів *Chlorococcum*, *Nostok*, *Scytonema*, *Trebouxia*, *Trentepohlia* та інші.

Із часом, особливо у більш сухих та інсольованих умовах, у порушених екосистемах з'являються ліхнеофільні гриби, які в поєднанні з піонерними водоростями формують лишайники. Зрідка на твердих кристалічних субстратах можемо спостерігати колонії ліхнеофільних грибів, які не зв'язані з водоростями або їхній зв'язок неповний. На ранніх стадіях домінування лишайників серед автотрофів порушених екоотопів супроводжується поширенням видів накипних біоморф. Згодом починають траплятися листуваті форми. Це велика кількість видів, серед яких переважають представники родів *Xanthoparmelia*, *Aspicilia*, *Pertusaria*, *Rhizocarpon*, *Trapelia*, *Acarospora*, *Diploshistes* та *Lecanora*.

Мохи, як представники наступної стадії відновлення, з'являються за умови появи хоч невеликої частини рихлого субстрату, за який можна зачепитися ризоїдами. Оскільки це є вимогою для існування більшості кущуватих лишайників, то вони утворюють із ними змішані лишайниково-мохові угруповання. Це класи рослинних угруповань *Psoretea decipiensis*, *Ceratodonto purpurei-Polytrichetea piliferi*, *Cladonio digitatae-Lepidozietea reptantis*. Найбільш поширеними з них є *Ceratodonto purpurei-Polytrichetea piliferi* та *Cladonio digitatae-Lepidozietea reptantis*. З появою багаторушної рослинності вищих судинних рослин мохи та лишайники відходять на другий план. Вони виконують роль епіфітних продуцентів (переважно *Xanthoparmelia* та *Lecanora*) або міняють екологічну нішу патієнтів на нішу експлерентів.

Часто разом із мохами або дещо пізніше формуються рослинні угруповання з вищих судинних екстремофілів. В основному це різні представники роду *Sedum*, *Thymus* або родини *Caryophyllaceae*. Вони частіше за все формують рослинність класів *Sedo-Scleranthetea* та *Koelerio glaucae-Corynephoretea canescentis* (Хом'як, 2022).

Синтаксономічна схема рослинності цих класів має такий вигляд:

Клас *Sedo-Scleranthetea*; порядок *Alyso alyssoidis-Sedetalia albi*; союз *Alyso alyssoidis-Sedion*; асоціація *Sedo acri-Dianthetum hypanicii*; порядок *Sedo-Scleranthetalia: Hyperico perforati-Scleranthion perennis*; асоціація *Thymo pulegioidis-Sedetum sexangularis*; союз *Sedo-Scleranthion*; асоціація *Sempervivo rutenici-Sedetum ruprechtii*; асоціація *Vincetoxico hirundinari-Rumicetum acetosellae*.

Клас *Koelerio glaucae-Corynephoretea canescentis*; порядок *Corynephorotalia canescentis*; союз *Corynephorion canescentis*; асоціація *Corniculario aculeatae-Corynephorum canescentis*; асоціація *Corynephorosilenetum tataricae*; союз *Koelerion glaucae*; асоціація *Diantho borbasii-Agrostietum syreistschikovii*.

На більш пізніх стадіях сукцесії, за умови сповільненого розвитку деревно-чагарникової рослинності, формується рослинність класів *Calluno-Ulicetea* та *Nardetea strictae*.

Синтаксономічна схема рослинності цих класів має такий вигляд:

Клас *Calluno-Ulicetea*; порядок *Vaccinio myrtilli-Genistetalia pilosae*, *Calluno-Genistion pilosae*, *Calluno-Genistetum*; союз *Euphorbio-Callunion*; асоціація *Euphorbio cyparissiae-Callunetum vulgaris*; асоціація *Scabioso canescens-Genistetum*.

Клас *Nardetea strictae*; порядок *Nardetalia*; союз *Violion caninae*; асоціація *Polygalo vulgaris-Nardetum strictae*, асоціація *Campanulo rotundifoliae-Dianthetum deltoidis*, асоціація *Calluno-Nardetum*, асоціація *Nardo-Juncetum squarrosi*, асоціація *Juncetum squarrosi*, асоціація *Luzula palleescens-Nardetum strictae*.

Окрім серій, що ведуть до утворення природної рослинності, часто спостерігаються й ті, ключову роль у яких відіграє синантропна рослинність. Це часто спостерігається, якщо елементи кар'єру нещодавно використовувались як сільськогосподарські угіддя (рілля) або межують із нею; відбувається інтенсивний рух ґрунтовими дорогами та стежками; ділянка дещо багатша на

поживні елементи. Перші стадії відновлення таких ділянок часто займає сегетальна рослинність класу *Stellarietea mediae*. Його синтаксономічна схема має такий вигляд:

Клас *Stellarietea mediae*: порядок *Aperetalia spicae-venti*: союз *Scleranthion annui*: асоціація *Centaureo-Aperetum spicae-venti*, асоціація *Violo arvensis-Centaureetum cyani*, асоціація *Aphano-Matricarietum*; союз *Galeopsion bifidae*: асоціація *Apero spicae-venti-Papaveretum rhoeadis*, асоціація *Euphobio pepili-Chenopodietum albi*; порядок *Atriplici-Chenopodietalia albi*: союз *Panico-Setarion*: асоціація *Echinochloa-Setarietum*: порядок *Eragrostietalia*: союз *Eragrostion cilianensis-minoris*: асоціація *Cynodontetum dactyli*, асоціація *Digitario sanguinalis-Eragrostietum minoris*, асоціація *Eragrostio-Amaranthenetum albi*, асоціація *Portulacetum oleraceae*, союз *Salsolion ruthenicae*; асоціація *Plantagini indicae-Digitalietum sanguinalis*; порядок *Papaveretalia rhoeadis*: союз *Veronico-Euphorbion*; асоціація *Veronicetum hederifolio-triphylli*; порядок *Sisymbrietalia sophiae*: союз *Atriplicion*: асоціація *Atriplicetum nitentis*; союз *Hordeion murini*; асоціація *Brometum tectorum*, асоціація *Hordeetum murini*; союз *Malvion neglectae*; асоціація *Hyoscyamo nigri-Malvetum neglectae*, асоціація *Polygono arenastri-Chenopodietum muralis*; союз *Sisymbriion officinalis*: асоціація *Artemisietum annuae*, асоціація *Chamaeplietum officinalis*, асоціація *Erigeronto canadensis-Lactucetum serriolae*, асоціація *Ivaetum xanthiifoliae*, асоціація *Sisymbrietum loeselii*, асоціація *Sisymbrietum sophiae*.

Коли поживних речовин бракує, піонерна фаза заселення таких екоотопів відбувається завдяки кореневищним рудеральним рослинам пирію повзучого та проміжного, мати й мачухи й осоки шорстковолосою. Це рослинні угруповання порядку *Agropyretalia intermedio-repentsis* класу *Artemisietea vulgaris*. Його синтаксономічна схема має такий вигляд:

Клас *Artemisietea vulgaris*: порядок *Agropyretalia intermedio-repentsis*: союз *Convolvulo-Agropyron repentis*: асоціація *Agropyretum repentis*, асоціація *Elytrigio repentis-Lycietum barbarum*, асоціація *Poo compressae-Tussilaginetum farfarae*.

Такі угруповання швидше за інші екстремофіли створюють умови для переходу до більш пізніх стадій автогенної сукцесії. Це можуть бути як похідні або корінні ліси, так і угруповання насінневих рудералів. Синтаксономічна схема останніх має такий вигляд:

Клас *Artemisietea vulgaris*: порядок *Onopordetalia acanthii*: союз *Arction lappae*: асоціація *Arctietum lappae*, асоціація *Arctio-Artemisietum vulgaris*, асоціація *Balloto-Malvetum sylvestris*, асоціація *Hyoscyamo nigri-Conietum maculati*, асоціація *Leonuro-Arctietum*, асоціація *Sambucetum ebuli*, асоціація *Echio-Verbascetum*; союз *Daucos-Melilotenion*: асоціація *Berteroetum incanae*, асоціація *Daucos-Picridetum hieracioidis*, асоціація *Pastinaco sativae-Daucetum carotae*; союз *Onopordion acanthii*: асоціація *Artemisio vulgaris-Echinopsetum sphaerocephali*, асоціація *Balloto-Artemisietum absintii*, асоціація *Carduo acanthoidis-Onopordetum acanthii*, асоціація *Onopordetum acanthii*, асоціація *Potentilo-Artemisietum absintii*, асоціація *Tanaceto-Artemisietum vulgaris*.

Проникнення виробітку нижче ґрунтових водоносних горизонтів, зміна системи переміщення води й утворення шарів із водонепроникних порід призводить до того, що виникають прибережно-водні угруповання, не пов'язані з водоймами. Найчастіше їх утворюють очерет південний і череда трироздільна. У другому випадку фітоценоз утворюється тоді, коли відбувається постійне засмічення органічними речовинами елементу кар'єру з незначним шаром водонепроникних порід. Найчастіше це діюче або колишнє звалище побутового сміття, яке потрапило у відвали, або рештки рослин, які були захоплені технікою під час їх формування. У такому разі ми можемо спостерігати рослинність відповідно до синтаксономічної схеми:

Клас *Bidentetea tripartiti*: порядок *Bidentetalia tripartiti*: союз *Bidention tripartiti*: асоціація *Polygonetum hydropiperis*, асоціація *Bidentetum cernuae*, асоціація *Leersio-Bidentetum*, асоціація *Bidentetum tripartitae*, асоціація *Myosoto-Bidentetum frondosae*, асоціація *Junco bufonii-Bidentetum connatae*.

Без засмічення території з горизонтом водонепроникних порід джерелами доступного нітрогену формується асоціація *Phragmitetum australis* союзу *Phragmition* порядку *Phragmitetalia* класу *Phragmiti-Magnocaricetea*.

Елементи більш пізніх стадій автогенної сукцесії, яка супроводжує відновлення природної рослинності, можуть з'являтися практично одразу. Однак їм потрібно декілька років, щоб стати панівними едифікаторами й утворити власні угруповання. Ідеться про травино-чагарникову, чагарникову та лісо-чагарникову рослинність. Найчастіше

це угруповання класів *Epilobietea angustifolii*, *Robinietaea*, *Rhamno-Prunetea*, *Salicetea purpurea*, *Franguletea*. За деяких умов тут трапляються корінні ліси класів *Vaccinio-Piceetea* й *Alnetea glutinosae*, надзвичайно рідко, коли дубові ліси *Quercetea roboretraeae* *Carpino-Fagetea*, для формування яких на порушеному субстраті потрібно кілька десятиліть.

Клас *Epilobietea angustifolii* формують куничник наземний і різні види роду *Rubus*. Разом із луками порядку *Galietaalia veri* (клас *Molinio-Arrhenatheretea*) вони формують стадію злаковників на помірно зволжених ґрунтах. Їхня синтаксономія має такий вигляд:

Клас *Epilobietea angustifolii*: порядок *Galeopsio-Senecionetalia sylvatici*: союз *Fragarion vescae*: *Rubo idaei-Sambucetum ebuli*; союз *Epilobion angustifolii*: асоціація *Rubo-Chamaenerietum angustifolii*, асоціація *Rubetum idaei*, асоціація *Calamagrostietum epigii*.

Клас *Molinio-Arrhenatheretea*: порядок *Galietaalia veri*: союз *Agrostion vinealis*: асоціація *Koelerio-Agrostietum vinealis*, асоціація *Agrostio vinealis-Calamagrostietum epigeioris*, асоціація *Agrostietum vinealis-tenuis*, асоціація *Carici praecoci-Alopecuretum pratensis*, асоціація *Poo angustifoliae-Arrhenatheretum elationi*, асоціація *Bromopsidetum inermis*, асоціація *Potentillo argenteae-Poetum angustifoliae*, асоціація *Achillea submiefolium-Dactyletum glomeratae*.

Якщо вологість ґрунту зростає, то тут формуються злаковники порядку *Molinetalia* (союз *Mentho longifoliae-Juncion inflexi*: асоціація *Juncetum effusi*, асоціація *Junco effusi-Molinietum caeruleae*; союз *Deschampsion caespitosae*: асоціація *Poo trivialis-Alopecuretum pratensis*, асоціація *Poo palustris-Alopecuretum pratensis*, асоціація *Holcetum lanati*; союз *Calthion*: асоціація *Scirpetum sylvatici*; союз *Filipendion ulmariae*: асоціація *Lysimachio-Filipenduletum*, асоціація *Veronico-Euphorbietum*).

В угрупованнях злаковників поступово формується дерево-чагарниковий ярус. Найчастіше це похідні ліси класу *Robinietaea*. Найбільш поширеними є різні варіанти асоціації *Salicetum capreae* – березові й осикові ліси за участі верби козячої. Другою за поширенням групою похідних лісів є угруповання, сформовані інвазійними видами: робінією звичайною та кленом американським. Їхня синтаксономічна схема має такий вигляд:

Клас *Robinietaea*: порядок *Cheledonio-Robinietaalia*: союз *Balloto nigrae-Robinion pseudoacaciae*: асоціація *Cheledonio-Pinetum sylvestris*, союз *Chelidonio-Acerion negundo*: асоціація *Cheledonio-Aceratum negundi*, асоціація *Poo nemoralis-Carpinetum*; союз *Cheledonio-Robinion*: асоціація *Cheledonio-Robinietum*, асоціація *Impatienti parviflorae-Robinietum*, асоціація *Sambuco nigrae-Robinietum*; порядок *Sambucetalia racemosae*: союз *Sambuco-Salicion capreae*: асоціація *Sambucetum racemosae*, асоціація *Salicetum capreae*.

У більш зволжених місцях, частіше за все в районі водойм, трапляються прируслові вербові ліси (клас *Salicetea purpurea*) або верболози (клас *Franguletea*). У першому ценозі провідну роль відіграє верба ламка (на Лівобережжі – верба біла), у другому – верба попеляста.

Зрідка трапляються типові чагарникові угруповання класу *Rhamno-Prunetea*, сформовані тереном звичайним і різними видами роду *Crataegus* і *Rosa*. Це частіше спостерігається на південь від Полісся.

Корінні ліси частіше за все є угрупованнями соснових лісів класу *Vaccinio-Piceetea* та вільховими лісами класу *Alnetea glutinosae*. У першому випадку вони утворюють дві асоціації, а саме: сосново-кладонієві ліси *Cladonio-Pinetum* і сосново-зеленомошні ліси *Dicrano-Pinetum*. Вільхові ліси практично завжди є угрупованнями асоціації *Ribeso nigri-Alnetum*.

Сукцесійна серія на порушених ґрунтах може бути завершеною або сповільнитися та набути вигляду катастрофічного клімаксу. Завершеність сукцесійної серії або її зупинку не просто визначити за допомогою маршрутно-експедиційних досліджень. Загальноприйнятою нормою для вивчення динаміки якоїсь території є дослідження тривалістю понад 12 років. Однак це дозволить припустити існування флуктуацій і ймовірність катастрофічного клімаксу. Різні стадії автогенної сукцесії в оптимальних умовах середовища можуть тривати довше зазначеного періоду. Так, стадія похідних лісів може розтягнутися до 70–90 років. На формування угруповань кліматичного (енергетичного) клімаксу часом необхідно 150–250 років. Для встановлення вектора та темпу динаміки заселення порушеного ґрунту ми використовуємо дані про час із миті порушення та показник природної динаміки на мить обстеження. Це дозволяє побудувати модель, за трендами якої визна-

чається темп динаміки, а отже, наявність катастрофічного клімаксу чи рух до енергетичного (кліматичного) клімаксу.

Модель динаміки екосистем, виражена через показник природної динаміки та час, має такий вигляд:

$$S_t = a + b \ln t,$$

де S_t – показник природної динаміки; a – коефіцієнт регресії, який характеризує вплив початкових умов на сукцесію, b – коефіцієнт регресії, який характеризує вплив зовнішніх чинників на темп сукцесії, t – час.

Поєднанням моделі динаміки екосистем з особливостями найближчого фітоценозичного оточенням порушеної ділянки та характеристикою утвореного субстрату ми можемо робити високоймовірні прогнози подальшого відновлення рослинності. Згідно зі спостереженнями 2022–2023 рр., на перебіг автогенної сукцесії, яка супроводжує відновлення природних екосистем, більший

вплив має тип порушеного субстрату, ніж спосіб порушення. Це можна використовувати як на гірничих об'єктах, так і на вражених військовими діями територіях.

Висновки

Динаміка відновлення рослинності залежить від властивостей едафотопу та не залежить від способу його руйнування.

Ключовими характеристиками едафотопу, які впливають на темпи та вектори динаміки, є розміри його часточок, рівень зволоженості, кількість елементів мінерального живлення, сусідство з певними типами фітоценозів, наявність водонепроникного шару, банку насіння, антропогенного тиску.

Оскільки темпи та вектори відновлення рослинності не залежать від способу порушення її цілісності, то для прогнозів пост-мілітарного відновлення масивів дикої природи можна використовувати моделі динаміки рослинних угруповань у районі гірничих виробітків відкритого типу.

Список використаної літератури

- Дідух Я.П., Хом'як І.В. Оцінка енергетичного потенціалу екоотопів залежно від ступеня їх геме-робії на прикладі Словечансько-Овруцького кряжу. *Укр. ботан. журн.* 2007. №1. С. 235–243.
- Продромус рослинності України / Д.В. Дубина та ін. Київ : Наукова думка, 2019. 784 с.
- Тимченко А.Ю., Хом'як І.В. Автогенні сукцесії в екосистемах гірничих виробок в долині річки Гуйва. *Біологічні дослідження – 2019: збірник наукових праць*. Житомир : «Полісся». 2019. С. 353–354.
- Хом'як І.В. Особливості антропогенного впливу на природну динаміку екосистем Українського Полісся. *Екологічні науки*. 2018. №1 (20), Т. 2. С. 69–73.
- Хом'як І.В., Василенко О.М., Гарбар Д.А., Андрійчук Т.В., Костюк В.С., Власенко Р.П., Шпаковська Л.В., Демчук Н.С., Гарбар О.В., Онищук І.П., Коцюба І.Ю. Методологічні підходи до створення інтегрованого синфітоіндикаційного показника антропогенної трансформації. *Екологічні науки*. 2020. № 5 (32), Т. 1. С. 136–141.
- Хом'як І.В., Гарбар Д.А., Андрійчук Т.В., Костюк В.С., Власенко Р.П. Динаміка відновлюваної рослинності піщаних кар'єрів Житомирського Полісся. *Екологічні науки*. 2021. № 6 (39). С. 204–207.
- Хом'як І.В. Синтаксономія відновлюваної рослинності кар'єрів Центрального Полісся. *Український ботанічний журнал*. 2022. №79 (3). С.142–153.
- Alpatova O., Maksymenko I., Patseva I., Khomiak I., Gandziura V. Hydrochemical state of the post-military operations water ecosystems of the Moschun, Kyiv region. *XVI International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*. Kyiv. 15–18 November 2022.
- Atiyeh B.S., Gunn S.W., Hayek S.N. Military and Civilian Burn Injuries During Armed Conflicts. *Annals of Burns and Fire Disasters*. 30 December 2007. Vol. 20, No 4. P. 203–215.
- Hagen Dagmar, Evju Marianne, Henriksen Pål Skovli, Solli Svein, Erikstad Lars, Bartlett Jesamine. From military training area to National Park over 20 years: Indicators for outcome evaluation in a large-scale restoration project in alpine Norway. *Journal for Nature Conservation*. April 2022. Vol. 66. P. 125–126.
- Hennekens S. Turboveg for Windows. 1998–2007. Version 2. Wageningen: *Inst. voor Bos en Natuur*, 2009. 84 p.
- Hourdequin Marion, Havlick David G. Ecological Restoration in Context: Ethics and the Naturalization of Former Military Lands. *Ethics, Policy & Environment* Vol. 14. 2011 [Електронний ресурс]. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13668791003778891> (дата звернення 05.05.2023)

Jacobson Susan K., and Marynowski Susan B. M.S. New Model for Ecosystem Management Interpretation: Target Audiences on Military Lands. *Journal of Interpretation Research*. 1998. Vol. 3. No 1. P. 1–20.

Khomiak Ivan, Harbar Oleksandr, Demchuk Nataliia, Kotsiuba Iryna and Onyshchuk Iryna Above-ground phytomas dynamics in autogenic succession of an ecosystem. *Forestry ideas*. 2019. Vol. 25, № 1 (57). P. 136–146.

Morel Jean Louis, Chenu Claire & Lorenz Klaus. (2015) Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs). *Journal of Soils and Sediments*. Vol. 15. P. 1659–1666.

Westhoff V, Maarel E. van der. The Braun-Blanquet approach. *Handbook of Vegetation Science*. Part V: *Ordination and Classification of Vegetation*. Ed. By R.H. Whittaker. The Hague, 1973. P. 619–726.

References (translated & transliterated)

Didukh, Ya.P., & Khomiak, I.V. (2007). Otsinka enerhetychnoho potentsialu ekotopiv zalezno vid stupenia yikh hemerobii na prykladi Slovechansko-Ovrutskoho kriazhu [Estimation of the energy potential of ecotopes depending on the degree of their hemerobia on the example of the Slovak-Ovrutsky Ridge]. *Ukrainskyi botanichnyi zhurnal [Ukrainian botanical magazine]*, 1, 235–243 [in Ukrainian].

Dubyna, D.V., et al. (2019). Prodrôme of the vegetation of Ukraine [Prodromus vegetation of Ukraine]. Kyiv : *Naukova dumka [Scientific thought]* [in Ukrainian].

Tymchenko, A.Yu., & Khomiak, I.V. (2019). Avtoheni suktsepii v ekosystemakh hirnychkykh vyrobok v dolyni richky Huiva [Autogenous successions in the ecosystems of mine workings in the Guiva River valley]. *Biologichni doslidzhennia – 2019: zbirnyk naukovykh prats [Collection of scientific works «Biological research – 2019»]*. Zhytomyr: «Polissia», 353–354 [in Ukrainian].

Khomiak, I.V. (2018). Osoblyvosti antropohennoho vplyvu na pryrodnu dynamiku ekosystem Ukrainskoho Polissia [Peculiarities of anthropogenic influence on the natural dynamics of ecosystems of the Ukrainian Polissia]. *Ekologichni nauky [Environmental sciences]*, 1 (20), 2, pp 69–73 [in Ukrainian].

Khomiak, I.V., Vasylenko, O.M., Harbar, D.A., Andriichuk, T.V., Kostiuk, V.S., Vlasenko, R.P., Shpakovska, L.V., Demchuk, N.S., Harbar, O.V., Onyshchuk, I.P., & Kotsiuba, I.Iu. (2020). Metodolohichni pidkhody do stvorennia intehrovanoho synfitoindykatsiinoho pokaznyka antropohennoi transformatsii [Methodological approaches to the creation of an integrated synphyto-indicative indicator of anthropogenic transformation]. *Ekologichni nauky [Environmental sciences]*, 5(32). 1, 136–141 [in Ukrainian].

Khomiak, I.V., Harbar, D.A., Andriichuk, T.V., Kostiuk, V.S., & Vlasenko, R.P. (2021). Dynamika vidnovliuvanoi roslynnosti pishchanykh karieriv Zhytomyrskoho Polissia [Dynamics of regenerating vegetation in sand quarries of Zhytomyr Polissia]. *Ekologichni nauky [Environmental sciences]*, 6(39), 204–207 [in Ukrainian].

Khomiak, I.V. (2022). Syntaksonomiia vidnovliuvanoi roslynnosti karieriv Tsentralnoho Polissia [Syntaxonomy of the regenerating vegetation of the quarries of the Central Polissia]. *Ukrainskyi botanichnyi zhurnal [Ukrainian botanical magazine]*, 79(3), 142–153 [in Ukrainian].

Alpatova, O., Maksymenko, I., Patseva, I., Khomiak, I., & Gandziura, V. (2022). Hydrochemical state of the post-military operations water ecosystems of the Moschun, Kyiv region. *XVI International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”*. Kyiv. 15–18 November 2022 [in English].

Atiyeh, B.S., Gunn, S.W., & Hayek, S.N. (2007). Military and Civilian Burn Injuries During Armed Conflicts. *Annals of Burns and Fire Disasters*. 30 December 2007, 20 (4), 203–215 [in English].

Hagen Dagmar, Evju Marianne, Henriksen Pål Skovli, Solli Svein, Erikstad Lars, Bartlett Jesamine. (2022). From military training area to National Park over 20 years: Indicators for outcome evaluation in a large-scale restoration project in alpine Norway. *Journal for Nature Conservation*. 66, 125–126 [in English].

Hennekens, S. (2009). Turboveg for Windows. 1998–2007. Version 2. Wageningen: *Inst. voor Bos en Natuur*, 84 [in English].

Hourdequin Marion, Havlick David G. (2011). Ecological Restoration in Context: Ethics and the Naturalization of Former Military Lands. *Ethics, Policy & Environment* Vol. 14. [Electronic resource] URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1366879100377889/> (access date 05.05.2023) [in English].

Jacobson Susan, K., & Marynowski Susan, B. M.S. (1998). New Model for Ecosystem Management Interpretation: Target Audiences on Military Lands. *Journal of Interpretation Research*, 3 (1) 1–20 [in English].

Khomiak Ivan, Harbar Oleksandr, Demchuk Nataliia, Kotsiuba Iryna, Onyshchuk Iryna (2019). Above-ground phytomas dynamics in autogenic succession of an ecosystem. *Forestry ideas*, 25(1), 57, 136–146 [in English].

Morel Jean Louis, Chenu Claire & Lorenz Klaus. (2015). Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs). *Journal of Soils and Sediments*, 15, 1659–1666 [in English].

Westhoff V, Maarel E. van der. (1973). The Braun-Blanquet approach. *Handbook of Vegetation Science. Part V: Ordination and Classification of Vegetation*, 619–726 [in English].

Отримано: 05.09.2023

Прийнято: 10.10.2023



ХІМІЯ

УДК 544.723:546.95:551.524.2
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.8>

СОРБЦІЯ ЙОННИХ ФОРМ ЦИНКУ (II) ІЗ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ ПОВЕРХНЯМИ МАГНІТОЧУТЛИВИХ НАНОКОМПОЗИТИВ, МОДИФІКОВАНИХ ГІДРОКСИПАТИТОМ

**О. М. Камінський¹, Р. О. Денисюк², М. В. Чайка³, С. В. Писаренко⁴,
Д. Ю. Панасюк⁵**

Проблема якості питної води останніми десятиліттями дуже гостра. Масовий викид шкідливих речовин у навколишнє середовище, особливо йонів важких металів, які, серед іншого, можуть потрапляти під час бойових дій на території України, становить серйозну загрозу для живих

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 асистент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: snezhunka1107@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5978-487X

⁵ судовий експерт
(Житомирський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр Міністерства внутрішніх справ 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

організмів і може негативно вплинути на стабільність екосистеми. Отже, очищення забрудненої води до якості питної залишається досить актуальною проблемою. Однією з ефективних технологій очищення природних вод від йонів важких металів є сорбційне очищення, яке передбачає використання високоефективних сорбентів, що володіють необхідним набором фізико-хімічних властивостей. До таких матеріалів можна віднести магніточутливі наноматеріали на основі магнетиту, зокрема магнетит, поверхня якого модифікована гідроксиапатитом ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ГА}$). У роботі проведено синтез нанорозмірного магнетиту, методами електронної мікроскопії встановлено, що частинки магнетиту кулястої форми схильні до утворення агрегатів, що характеризуються розмірами 3–23 нм. Концентрація активних –ОН груп поверхні становить 2,2 ммоль/г за питомої площі поверхні $S_{\text{ннт}} = 90 \text{ м}^2/\text{г}$. Здійснено модифікування магнетиту гідроксиапатитом золь-гель методом, визначено, що наноккомпозит містить активні –ОН групи поверхні, концентрація яких становить 2,2 ммоль/г за питомої площі поверхні $S_{\text{ннт}} = 110 \text{ м}^2/\text{г}$. Визначено, що форма частинок наноккомпозиту не відрізняється від вихідного магнетиту, а середній розмір частинок становить 25–30 нм. Розрахунок середніх розмірів кристалітів як вихідного магнетиту, так і $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ГА}$ методом Шеррера показав, що одержані розрахункові дані добре узгоджуються з мікроскопічними дослідженнями.

Досліджено сорбційну активність щодо йонних форм Цинку (II) поверхнями магніточутливого нанорозмірного магнетиту (Fe_3O_4) та створеного на його основі наноккомпозиту магнетит/гідроксиапатит ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ГА}$). Установлено, що за умов статичної сорбції йонних форм Zn^{2+} за 293 К та рН = 8,5 максимальний ступінь вилучення становить 65,2% для поверхні Fe_3O_4 та 98,5% для $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ГА}$, а ємність сорбенту за вказаних умов сорбції становить 21,7 мг/г для Fe_3O_4 та 32,8 мг/г для $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ГА}$ відповідно. Визначено, що процес сорбції описується моделлю псевдодругого порядку, а величина коефіцієнта розподілу на межі «сорбат – сорбент» вказує на те, що модифікування поверхні магнетиту покращує сорбційну здатність наноккомпозиту. Визначено, що процес сорбції відбувається на потенційно неоднорідних поверхнях, а величина енергії сорбції вказує на фізичну сорбцію йонних форм Цинку (II) обома поверхнями. Показано перспективність використання магніточутливого наноккомпозиту $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ГА}$ як сорбенту йонних форм Цинку (II) з водних розчинів.

Ключові слова: сорбція іонів важких металів, йонні форми Цинку у(II), магніточутливі наноматеріали, гідроксиапатит, магнетит, ізотерма адсорбції, хімія поверхні, колоїдна хімія.

SORPTION OF IONIC FORMS OF ZINC (II) FROM AQUEOUS SOLUTIONS BY SURFACES OF MAGNETO-SENSITIVE NANOCOMPOSITES MODIFIED WITH HYDROXYAPATITE

O. M. Kaminskiy, R. O. Denysiuk, M. V. Chayka, S. V. Pysarenko, D. Yu. Panasiuk

The problem of the quality of drinking water has been quite acute in recent decades. The mass release of harmful substances into the environment, especially heavy metal ions, which may enter during hostilities on the territory of Ukraine, pose a serious threat to living organisms and may negatively affect the stability of the ecosystem. Thus, the purification of polluted water to drinking quality remains a very urgent problem. One of the effective technologies for purifying natural waters from heavy metal ions is sorption purification, which involves the use of highly effective sorbents with the required set of physicochemical properties. Such materials include magnetite-based magnetite-sensitive nanomaterials, in particular, magnetite, the surface of which is modified with hydroxyapatite ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{HA}$). In the work, the synthesis of nanosized magnetite was carried out, using electron microscopy methods it was established that spherical magnetite particles are prone to the formation of aggregates characterized by the size of 3–23 nm. The concentration of active –OH groups on the surface is 2,2 mmol/g for the specific surface area $S = 90 \text{ м}^2/\text{г}$. Modification of magnetite with hydroxyapatite by the sol-gel method was carried out, and it was determined that the nanocomposite contains active –OH surface groups, the concentration of which is 2,2 mmol/g for the specific surface area $S = 110 \text{ м}^2/\text{г}$. It was determined that the shape of the particles of the nanocomposite does not differ from the original magnetite, and the average size of the particles is 25–30 nm. Calculation of the average crystallite sizes of both the original magnetite and $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{HA}$ using Scherrer's method showed that the calculated data are in good agreement with microscopic studies.

The sorption activity of zinc (II) ionic forms by the surfaces of magnetically sensitive nanosized magnetite (Fe_3O_4) and the magnetite/hydroxyapatite ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{HA}$) nanocomposite created on its basis was investigated. It was established that under the conditions of static sorption of ionic forms of Zn^{2+} at 293 K and рН = 8,5, the maximum degree of extraction is 65,2% for the Fe_3O_4 surface and 98,5%

for Fe_3O_4/HA , and the capacity of the sorbent under the specified sorption conditions is 21,7 mg/g for Fe_3O_4 and 32,8 mg/g for Fe_3O_4/HA , respectively. It was determined that the sorption process is described by a pseudo-second-order model, and the value of the distribution coefficient at the "sorbate – sorbent" interface indicates that the modification of the magnetite surface improves the sorption capacity of the nanocomposite. It was determined that the sorption process occurs on potentially heterogeneous surfaces, and the value of the sorption energy indicates the physical sorption of Zinc (II) ionic forms by both surfaces. The perspective of using the magnetically sensitive Fe_3O_4/HA nanocomposite as a sorbent of ionic forms of Zinc (II) from aqueous solutions is shown.

Key words: sorption of heavy metal ions, ionic forms of Zinc (II), magnetosensitive nanomaterials, hydroxyapatite, magnetite, adsorption isotherm, surface chemistry, colloidal chemistry.

Вступ

Проблема якості питної води, зокрема і в умовах військових дій на території України, залишається актуальною, оскільки забруднювачі військового походження передусім впливають на природні водойми. Натепер в Україні діє стандарт якості питної води (ДСТУ 7525:2014 Вода питна, 2014), де визначено основні нормативні показники забруднювачів води різного походження, іони важких металів також.

Відповідно до Угоди про асоціацію з ЄС та затверджену Директиву ЄС (Directive (EU) 2020/2184, 2020) воду визнано головним харчовим продуктом, тому пошук ефективних методів очистки води до якості питної залишається актуальним.

Іони важких металів, зокрема й іони Цинку (II), спричиняють шкідливий вплив на навколишнє середовище, оскільки вони здатні накопичуватися в живих тканинах, що надалі може спричинити загибель організму (Abdullah et al., 2019).

Наприклад, надлишок іонів Цинку (II), які потрапляють у водойми через видобуток корисних копалин, виробництво акумуляторів, деяких спеціальних сталей, отримання гальванічних покриттів, може призвести до проблем зі здоров'ям, ознаками яких є: нудота, блювота та спазми у шлунку. Уживання води з підвищеним рівнем іонів Zn^{2+} протягом тривалого часу може спричинити анемію, блювоту, пошкодження підшлункової залози, втрату апетиту та зниження рівня холестерину тощо (Azeez et al., 2023). Отже, вилучення іонів та іонних форм Цинку (II) є актуальним завданням.

Очищення природних і стічних вод від іонів важких металів є складним багатостадійним завданням, яке передбачає застосування фізико-хімічних процесів (флотації, адсорбції, мембранного розділення, фотокаталізу тощо), використання матеріалів різного функціонального призначення (сорбентів) і технологій, що включають в себе концентрування, розділення, вилучення

забруднювачів такого типу з розчинів, їх подальшу утилізацію чи перероблення.

Однією з ефективних технологій очищення природних вод від іонів важких металів, яка впроваджується у практику, є сорбційне очищення, що передбачає використання вискоелективних сорбентів. Серед розмаїття таких сорбентів гідне місце належить наноматеріалам і нанокompatитам, що володіють унікальним набором фізико-хімічних властивостей, серед яких: висока сорбційна здатність, біосумісність, безпечність для навколишнього середовища, належна стійкість у широкому діапазоні рН середовища тощо. Також такі матеріали повинні легко вилучатися з реакційного середовища, наприклад, за допомогою зовнішнього магнітного поля, тобто мають володіти високою магніточутливістю.

До таких нанокompatитів, що володіють необхідним набором фізико-хімічних властивостей, належать магніточутливі наноматеріали на основі магнетиту, зокрема магнетит, поверхня якого модифікована гідроксиапатитом ($Fe_3O_4/ГА$).

Гідроксиапатит – біла кристалічна речовина складу $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$, у якій мольне співвідношення між Ca / P перебуває в межах 1,7 : 1,5 або не перевищує 1,67 (Petranovska et al., 2015; Szcze et al., 2017). Він є унікальною природною формою кальцію фосфату, що міститься в кістках тварин і людини. Однією з важливих властивостей гідроксиапатиту є те, що він здатний утворювати різноміщені ізоморфні структури за сорбції катіонних та аніонних форм іонів із розчинів, властивості яких залежать від утвореної структури, розподілу іонів у структурі, розміру частинок тощо (Pai et al., 2020). Тому гідроксиапатит використовується як ефективний модифікатор сорбентів, магнетиту також.

Наприклад, авторами в роботі (Erdemoglu et al., 2006) наведено дзета-потенціал природного магнетиту та показано, що адсорбція йонів важких металів, зокрема Zn^{2+} , і їх

осадження у формі гідроксидів і оксалатів на мінеральній поверхні є панівними процесами під час створення заряду поверхні в сильнолужних суспензіях. Також досліджено механізми сорбції іонів за різних значень рН водних розчинів.

Авторами (Guo et al., 2017) синтезовано новий магнітний біoadсорбент, модифікований L-аргініном ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CS-L}$), який використано для вилучення іонів Zn (II), Cd (II) і Pb (II) з водних розчинів адсорбційним методом. Набором фізико-хімічних методів (FT-IR, SEM, XRD, TGA та VSM) визначено структуру синтезованого біoadсорбенту. Досліджено кінетику й ізотерми адсорбції. Показано, що адсорбційна рівновага описується моделлю псевдодругого порядку, а ізотерми адсорбції іонів описуються моделлю Ленгмюра. Максимальна адсорбційна ємність для іонів Zn (II), Cd (II) і Pb (II) становила 256,41, 156,99 і 128,63 мг/г відповідно.

В оглядовій роботі (Abdullah et al., 2019) охарактеризовано можливості синтезу магніточутливих наносорбентів на основі ферум оксидів, упродовженних у твердотільні матриці цеолітів, кремнеземів, глин, вугілля, активованого вугілля, графену й оксидів графену, гідроксиапатитів тощо, які використано для адсорбції барвників та іонів важких металів. Показано, що морфологічна структура, розміри частинок, магнітні характеристики одержаних наноконструкцій значно впливають на процеси сорбції іонів важких металів (зокрема, іонів Zn^{2+}). Також впливають обрані умови сорбції (час, рН середовища).

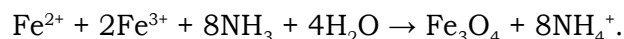
Як уже зазначалось (Pai et al., 2020), структура гідроксиапатиту сильно впливає на адсорбційні характеристики. Так, авто-

рами (Skwarek et al., 2014) синтезовано гідроксиапатит трьома різними методами. Фізичні властивості отриманого порошку було схарактеризовано за допомогою ДТА/ТГ, XRD, AFM і SEM мікроскопії. За допомогою радіоізотопного методу (^{14}C) досліджено питому адсорбцію іонів лимонної кислоти на межі розділу гідроксиапатиту як функцію концентрації іонів лимонної кислоти, концентрації NaCl та рН. Групою експериментаторів (Zheltova et al., 2020) запропоновано нову магнітну рідину на основі наноконструкції магнетит/гідроксиапатит ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@HAp}$) як контрастну рідину для МРТ.

Проте дослідження процесів сорбції іонів та іонних форм Zn^{2+} з водних розчинів поверхнею магніточутливого наноконструкції $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ГА}$ ще не досить вивчені, що було метою даної роботи.

Матеріал і методи

З метою вивчення процесів сорбції іонних форм Цинку (II) проведено синтез нанорозмірного магнетиту золь-гель методом Елмора відповідно до стехіометрії реакції (Petranovska et al., 2015; Камінський та ін., 2013):



Як вихідні матеріали для синтезу використано $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ марки «ч.д.а.», $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ марки «ч» та 25% водний розчин NH_3 марки «ч.д.а.».

Отриманий золь осаджували в магнітному полі, промивали дистильованою водою. Методами електронної мікроскопії (Трансмісійний електронний мікроскоп (JEOL – 1230), Японія) встановлено, що частинки магнетиту кулястої форми схильні до утворення агрегатів, що характеризуються розмірами 3–23 нм (рис. 1 (а)). Середній роз-

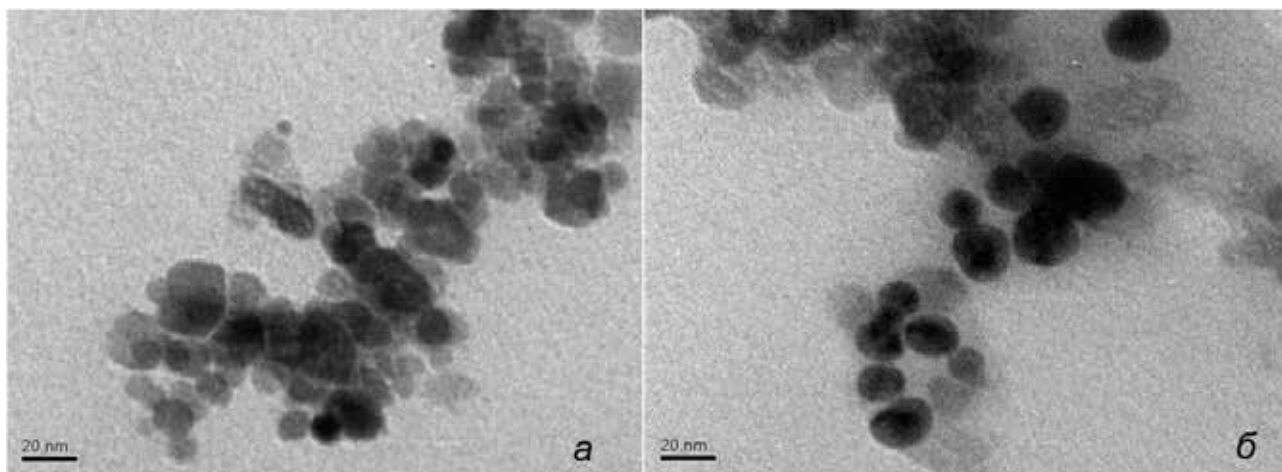
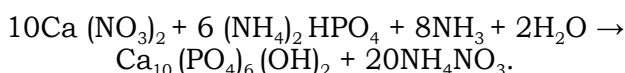


Рис. 1. ТЕМ зображення вихідного Fe_3O_4 (а) та наноконструкції $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ГА}$ (б)

мір часток залежить від умов синтезу, розподілом за розмірами можна керувати технологічно. Концентрація активних –ОН груп поверхні становить 2,2 ммоль/г за питомої площі поверхні $S_{\text{шт}} = 90 \text{ м}^2/\text{г}$.

За модифікування поверхні магнетиту гідроксиапатитом необхідну кількість вихідних компонентів розраховували таким чином, щоб молярне співвідношення Ca:P було в межах 1,7:1,5 (Petranovska et al., 2015; Камінський та ін., 2013). Покриття гідроксиапатиту на поверхні високодисперсного магнетиту отримували золь-гель методом згідно з реакцією:



Водні розчини 0,1 М $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ і 0,1 М $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ доводили до рН = 11 водним розчином амоніаку (25%) (рН середовища визначали іономіром I-160M). Наважку Fe_3O_4 поміщали в розчин $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, до якого поступово за інтенсивного перемішування додавали розчин $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Реакційну суміш перемішували протягом 1 години під час нагрівання на електричній плитці до 100 °С, потім залишали на 24 години.

Утворений наноккомпозит $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ГА}$ промивали дистильованою водою до нейтрального рН і відокремлювали за допомогою постійного магніту. Одержаний наноккомпозит містить активні –ОН групи поверхні, концентрація яких становить 2,2 ммоль/г за питомої площі поверхні $S_{\text{шт}} = 110 \text{ м}^2/\text{г}$. ТЕМ дослідження одержаного наноккомпозиту показали, що середній розмір частинок 25–30 нм, форма частинок не відрізняється від вихідного магнетиту (див. рис. 1 (б)).

Вихідний магнетит і наноккомпозит $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ГА}$ досліджено методами рентгенівської дифрактометрії за допомогою дифрактометра ДРОН-УМ1 з використанням фокусування рентгенівських променів за Бреггом – Brentano, К α випромінювання анода ($\lambda = 0,179021 \text{ нм}$) та Fe-фільтра у відбитих променях та інфрачервоної Фур'є спектроскопії з використанням Фур'є-спектрометра "Perkin Elmer" (модель 1720X).

Для дослідження процесів сорбції іонних форм Цинку (II) з водних розчинів на поверхні магніточутливих наноккомпозитів розчини іонів Zn^{2+} з концентраціями від 10–200 мг/л готували зс стандартних водних розчинів нітратних солей зс доведенням відповідних точних об'ємів розчину до мітки в мірній колбі за допомогою ацетатно-аміачного буфера до рН = 7,0–7,5.

Сорбцію іонних форм Цинку (II) з водних розчинів здійснювали у статичному режимі за рН = 7,0–7,5 за кімнатної температури. До 0,03 г сорбенту додавали 5 мл розчину солі відповідної концентрації та струшували протягом 3 годин на шейкері, потім розчин відділяли від сорбенту за допомогою постійного магніту. Концентрацію іонів Zn^{2+} до та після адсорбції визначали атомно-абсорбційним методом за допомогою полум'яного спектрофотометра С-115-ПК у полум'яній суміші ацетилен-повітря за довжини спектральної лінії 213,9 нм.

Ємність сорбенту A (мг/г) розраховували за формулою:

$$A = \frac{(C_0 - C_p) \cdot V}{m}, \quad (1)$$

де C_0 і C_p – концентрація вихідного розчину та розчину після сорбції (мг/л), V – об'єм розчину (л), m – наважка сорбенту (г).

Ступінь вилучення R , % іонних форм Цинку (II) з водних розчинів обраховували за формулою:

$$R = \frac{(C_0 - C_p)}{C_0} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Коефіцієнт розподілу E (мл/г) обраховували за формулою:

$$E = \frac{A}{C_p}. \quad (3)$$

Для оброблення одержаних ізотерм сорбції іонних форм Цинку (II) з водних розчинів використано математичні моделі адсорбції Ленгмюра, Фрейндліха, Тьомкіна та Дубініна – Радушкевича.

Рівняння Ленгмюра описує процеси сорбції іонів на гомогенних (однорідних) центрах поверхні за умови, що всі активні центри є енергетично однорідними і на поверхні може утворюватись лише мономолекулярний шар адсорбату.

У лінійній формі дане рівняння можна записати так (Onyango et al., 2004; Tripathy et al., 2008):

$$\frac{C_p}{A} = \frac{C_p}{A} + \frac{1}{K_L \cdot A_\infty}, \quad (4)$$

де A – ємність сорбенту (мг/г); C_p – рівноважна концентрація іонів після сорбції (мг/л); A_∞ – максимальна сорбційна ємність моношару, мг/г; K_L – константа Ленгмюра, що описує термодинамічні умови сорбції, л/мг.

Рівняння Фрейндліха також описує мономолекулярну сорбцію, проте характеризує гетерогенні (нерівноцінні) центри поверхні,

на яких відбувається нерівномірний розподіл за енергіями, у лінійній (логарифмічній) формі має вигляд (Onyango et al., 2004; Tripathy et al., 2008):

$$\ln A = \ln K_{\phi} + \frac{1}{n} \ln C_p, \quad (5)$$

де K_{ϕ} та n – константи Фрейндліха, що характеризують сорбційну ємність та інтенсивність сорбції відповідно.

Рівняння Тьомкіна описує потенційно неоднорідні поверхні, на яких відбувається рівномірний розподіл сорбційних центрів за енергією, має вигляд (Onyango et al., 2004; Tripathy et al., 2008):

$$A = b_t \ln K_T + b_l \ln C_p, \quad (6)$$

де b_t – константа, що характеризує теплоту сорбції; K_T – константа Тьомкіна, яка відповідає максимальній енергії взаємодії «сорбат – сорбент» на межі поділу фаз.

Рівняння Дубініна – Радушкевича, яке дозволяє розрізнити фізичну та хімічну сорбцію іонів у лінійній формі, має вигляд (Onyango et al., 2004; Tripathy et al., 2008):

$$\ln A = \ln A_{\infty} - k\varepsilon^2, \quad (7)$$

де k – константа, що пов'язана з енергією сорбції, моль²/кДж²; ε – потенціал Поляні, який характеризує роботу перенесення сорбату з об'єму розчину до поверхні сорбенту, кДж/моль.

Потенціал Поляні можна розрахувати за формулою:

$$\varepsilon = RT \ln \left(1 + \frac{1}{C_p} \right), \quad (8)$$

де R – універсальна газова стала, 8,31 Дж/моль·К; T – абсолютна температура, К.

Модель Дубініна – Радушкевича вказує на природу сорбції сорбату на межі поділу фаз і може бути використана для розрахунку середньої вільної енергії сорбції (Onyango et al., 2004; Tripathy et al., 2008):

$$E = -(2k)^{-0.5}, \quad (9)$$

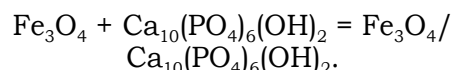
Величина k у рівнянні (9) є важливою характеристикою, оскільки за її значенням можна робити висновки про природу сил взаємодії між іонами розчину з активними центрами поверхні сорбенту та розрізнити фізичну та хімічну сорбцію.

Як зазначають автори (Onyango et al., 2004; Tripathy et al., 2008), якщо значення енергії сорбції (E) менше 8 кДж/моль, то процес сорбції має суто фізичний характер

(переважають міжмолекулярні сили взаємодії); якщо її значення перебуває в межах 8–16 кДж/моль, то сорбційний процес протікає за іонообмінним механізмом, а якщо енергія сорбції становить понад 16 кДж/моль, то це вказує на хемосорбцію на поверхні.

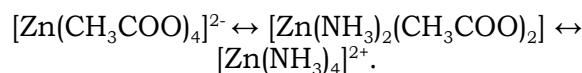
Результати та обговорення

Гідроксиапатит приєднується до поверхні магнетиту відповідно до схеми процесу модифікування за рН = 11:



Утворений наноккомпозит зберігає стійкість і сорбційні властивості в досить широкому діапазоні рН (3–12), що дозволяє вилучати іони важких металів фактично за будь якого рН-середовища. Розрахунок середніх розмірів кристалітів як вихідного магнетиту, так і $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ГА}$ методом Шеррера показав, що одержані розрахункові дані добре узгоджуються з мікроскопічними дослідженнями. рН-метричні дослідження показали, що найкраще сорбція іонних форм Цинку (II) на поверхнях обох сорбентів відбувається за рН = 6,5–7,5.

Як відомо (Ваes, 1976), у середовищі ацетатно-аміачного буфера за рН = 6,5–8,5 іони Zn^{2+} здатні утворювати дві різні іонні форми Цинку (II):



За нейтрального середовища може також існувати аквакомплекс $[\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_4]^{2+}$, який у разі зростання рН менш стійкий, а також проміжний нейтральний комплекс $[\text{Zn}(\text{NH}_3)_2(\text{CH}_3\text{COO})_2]$, що також менш стійкий за рН = 8, тому найбільш імовірна сорбція ацетатного й амінокомплексу цинку на поверхні як магнетиту, так і наноккомпозиту.

На рис. 2 показано залежність ступеня вилучення іонних форм Цинку (II) з розчину від часу контакту з поверхнями сорбентів.

Установлено, що за перші 30 хвилин від початку сорбції вилучається понад 60% іонних форм Цинку (II). Сорбційна рівновага досягається протягом 60 хвилин від початку контакту на межі поділу «сорбат – сорбент», а максимальне значення ступеня вилучення (R , %) становить 65,2% для поверхні Fe_3O_4 та 98,5% для поверхні $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ГА}$ відповідно. Розрахунок параметрів відповідно до кінетичних моделей сорбції показав, що сорбція іонних форм Цинку (II) з розчину для обох поверхонь описується моделлю псевдодру-

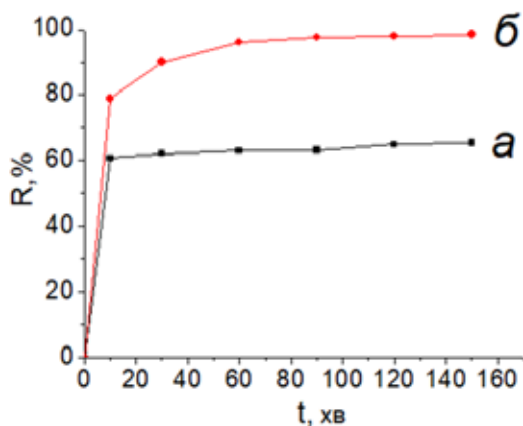


Рис. 2. Залежність ступеня вилучення іонних форм Цинку (II) з розчину від часу контакту з поверхнею Fe₃O₄ (а) та Fe₃O₄/ГА (б) (T = 293 K; m = 0,03 г; C₀ = 200 мг/л; рН = 8,5)

гого порядку, що вказує на міжчастинкову взаємодію між іонними формами сорбату. Лімітуючою стадією в даному разі є хімічна реакція обміну між частинками на межі поділу «сорбат – сорбент».

На рис. 3 показано ізотерми сорбції іонних форм Цинку (II) з розчину поверхнями сорбентів.

Встановлено, що протягом 120 хвилин від початку контакту розчину з поверхнею сорбенту ємність сорбенту для максимальної концентрації іонів (C₀ = 200 мг/л) становить 21,7 мг/г для Fe₃O₄ та 32,8 мг/г для Fe₃O₄/ГА відповідно. Збільшення питомої площі поверхні нанокompозиту Fe₃O₄/ГА, у порівнянні з немодифікованою поверхнею Fe₃O₄, може пояснити збільшення сорбційної ємності нанокompозиту. Характер форм ізотерм

нагадує L-тип (Ленгмюра), тобто пологую лінію з виходом на насичення.

У таблиці 1 наведено експериментальні дані сорбції іонних форм Цинку (II) поверхнями обох сорбентів.

Як видно з таблиці 1, зростання коефіцієнта розподілу (E, мл/г) для нанокompозиту Fe₃O₄/ГА, порівняно з немодифікованою поверхнею Fe₃O₄, у понад три рази вказує на більшу спорідненість гідроксиапатиту з іонними формами Цинку (II) на межі поділу «сорбат – сорбент».

У таблиці 2 наведено розрахункові дані відповідно до математичних моделей ізотерм сорбції (формули 4–8) іонних форм Цинку (II) з розчину поверхнями магніточутливих сорбентів.

Одержані розрахункові дані дозволяють стверджувати, що сорбція іонних форм Цинку (II) з розчину обома поверхнями добре описується моделлю ізотерм Тьомкіна, на що вказують коефіцієнти кореляції, які становлять понад 0,97. Це означає, що іонні форми Zn²⁺ із розчинів сорбуються на потенційно неоднорідних поверхнях, на яких відбувається рівномірний розподіл сорбційних центрів за енергією. Даний факт також підтверджує термогравіметричне визначення концентрації активних поверхневих –ОН груп обох сорбентів, значення яких за різної площі поверхні однакове (2,2 ммоль/г).

Розрахунок енергії сорбції за формулою 9 в обох випадках вказує на фізичну сорбцію іонних форм Цинку (II) з розчину обома поверхнями сорбентів, що дозволяє проводити десорбцію іонів із поверхні та повторне використання цих матеріалів для подальшого очищення води.

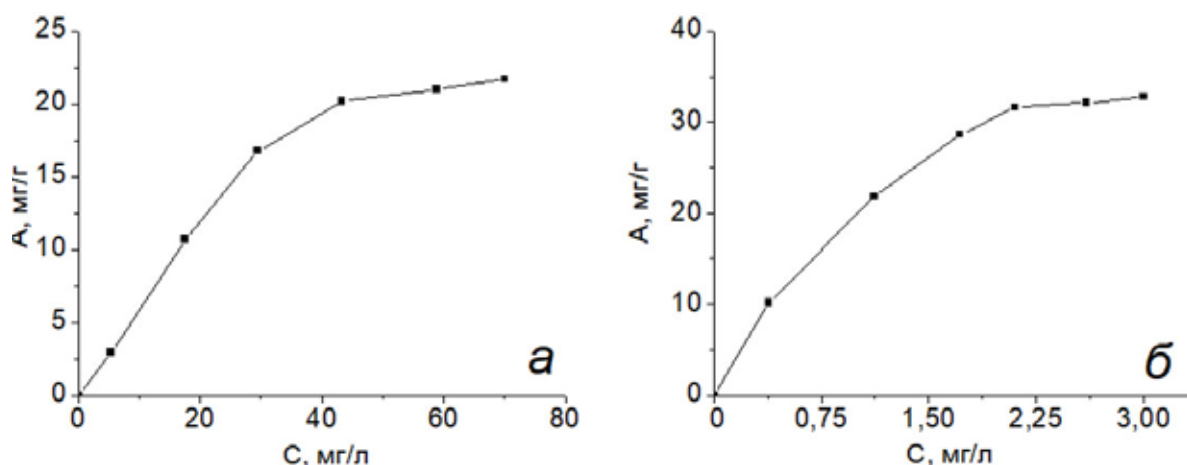


Рис. 3. Ізотерми сорбції іонних форм Цинку (II) поверхнею Fe₃O₄ (а) та Fe₃O₄/ГА (б) (T = 293 K; m = 0,03 г; t = 120 хв)

Таблиця 1

Експериментальні дані сорбції іонних форм Цинку (II) поверхнями Fe_3O_4 та $Fe_3O_4/ГА$ у статичному режимі протягом 120 хвилин за 293 К

Fe_3O_4			$Fe_3O_4/ГА$		
A, мг/г	R, %	E, мА/г	A, мг/г	R, %	E, мА/г
21,7	65,2	310	32,8	98,5	10 930

Таблиця 2

Розрахункові дані відповідно до математичних моделей ізотерм сорбції

Fe_3O_4						
Модель Ленгмюра			Модель Фрейндліха			
A_{max} , мг/г	K_L , л/мг	R^2	n	K_F	R^2	
42,017 ± 11,746	0,018 ± 0,008	0,799	1,264 ± 0,179	0,0968 ± 0,133	0,927	
Модель Тьомкіна			Модель Дубініна – Радушкевича			
b_T	K_T	R^2	A_{max} , ммоль/г	k, моль ² /кДж ²	E, кДж/моль	R^2
7,698 ± 0,510	0,268 ± 0,055	0,978	3,104 ± 0,410	0,177 ± 0,013	1,681 ± 0,065	0,974
$Fe_3O_4/ГА$						
Модель Ленгмюра			Модель Фрейндліха			
A_{max} , мг/г	K_L , л/мг	R^2	n	K_F	R^2	
49,628 ± 3,620	0,721 ± 0,079	0,977	1,693 ± 0,170	3,600 ± 0,067	0,959	
Модель Тьомкіна			Модель Дубініна – Радушкевича			
b_T	K_T	R^2	A_{max} , ммоль/г	k, моль ² /кДж ²	E, кДж/моль	R^2
11,554 ± 0,731	6,373 ± 0,317	0,980	2,355 ± 0,321	0,222 ± 0,022	1,500 ± 0,080	0,954

Висновки

Проведено синтез нанорозмірного магнетиту та модифікування його поверхні гідроксиапатитом золь-гель методом. Досліджено процеси сорбції іонних форм Цинку (II) з водних розчинів поверхнями Fe_3O_4 та $Fe_3O_4/ГА$. Установлено, що більша частина іонних форм Zn^{2+} сорбується за перші 30 хвилин від початку контакту реагентів. Сорбційна рівновага настає протягом 60 хвилин на межі поділу «сорбат – сорбент», а процес сорбції описується моделлю псевдодругого порядку. Установлено, що максимальний ступінь вилучення становить 65,2% для поверхні магнетиту та 98,5% для синтезованого нанокompозиту. Ємність сорбенту за умов сорбції становить 21,7 мг/г

для Fe_3O_4 та 32,8 мг/г для $Fe_3O_4/ГА$ відповідно. Величина коефіцієнта розподілу на межі «сорбат – сорбент» вказує на те, що модифікування поверхні магнетиту покращує сорбційну здатність нанокompозиту. Розрахунок за моделями ізотерм сорбції вказує на проходження сорбції відповідно до моделі Тьомкіна, тобто іонні форми Zn^{2+} із розчинів сорбуються на потенційно неоднорідних поверхнях, на яких відбувається рівномірний розподіл сорбційних центрів за енергією. Розрахунок енергії сорбції вказує на фізичну сорбцію іонних форм Цинку (II) обома поверхнями. Показано перспективність використання магніточутливого нанокompозиту $Fe_3O_4/ГА$ як сорбенту іонних форм Цинку (II) з водних розчинів.

Список використаної літератури

ВОДА ПИТНА Вимоги та методи контролювання якості ДСТУ 7525:2014 Видання офіційне [Електронний ресурс]. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/1-10672-dstu_voda_pytna.pdf (дата звернення 10.10.2023).

Камінський О.М., Кусяк Н.В., Петрановська А.А., Туранська С.П., Горбик П.П. Вплив природи поверхні наноструктур на основі однодоменого магнетиту на адсорбцію комплексів цис-дихлордіаміноплатини (II). *Хімія, Фізика та Технологія Поверхні*. 2013. Т. 4 (3). С. 283–292.

Камінський О.М., Кусяк Н.В., Петрановська А.Л., Абрамов М.В., Туранська С.П., Горбик П.П., Чехун В.Ф. Адсорбція комплексів *cis*-дихлордіамінплатини наноструктурами на основі магнетиту. *Металофізика та новітні технології*. 2013. Т. 35 (3). С. 389–406.

Abdullah N.H., Shameli K., Abdullah E.Ch., Abdullah L.Ch. Solid matrices for fabrication of magnetic iron oxide nanocomposites: Synthesis, properties, and application for the adsorption of heavy metal ions and dyes *Composites Part B: Engineering* 2019. V. 162. P. 538–568. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.075>.

Azeez N.R., Salih S.S., Kadhom M., Mohammed H.N., Ghosh T.K. Enhanced termination of zinc and cadmium ions from wastewater employing plain and chitosan-modified mxenes: Synthesis, characterization, and adsorption performance *Green Chemical Engineering*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2023.08.003>.

Baes Ch. F., Mesmer R.E. The hydrolysis of cations. *Wiley: NJ*. 1976. 512 p.

Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption [Електронний ресурс]. URL: <https://www.legislation.gov.uk/eudr/2020/2184> (дата звернення 10.10.2023).

Erdemoğlu M., Sarıkaya M. Effects of heavy metals and oxalate on the zeta potential of magnetite. *J. Colloid Interface Sci.* 2006. V. 300 (2). P. 795–804. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.04.004>.

Guo Sh., Jiao P., Dan Zh., Duan N., Zhang J., Chen G, Gao W. Synthesis of magnetic bioadsorbent for adsorption of Zn(II), Cd(II) and Pb(II) ions from aqueous solution *Chemical Engineering Research and Design*. 2017. V. 126. P. 217–231. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2017.08.025>.

Onyango M., Kojima Y., Aoyi O., Bernardo E., Matsuda H. Adsorption equilibrium modeling and solution chemistry dependence of fluoride removal from water by trivalent-cation-exchanged zeolite F-9. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. V. 279(2). P. 341–350. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.06.038>.

Pai Sh., Kini S., Selvaraj R., Pugazhendhi A. A review on the synthesis of hydroxyapatite, its composites and adsorptive removal of pollutants from wastewater *Journal of Water Process Engineering*. 2020. V. 38, 101574. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101574>.

Petranovska A.L., Abramov N.V., Turanska S.P., Gorbyk P.P., Kaminskiy A.N., Kusiak 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>.

Skwarek E., Janusz W., Sternik D. Adsorption of citrate ions on hydroxyapatite synthesized by various methods *J Radioanal Nucl Chem*. 2014. V. 299(3). P. 2027–2036. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2825-z>.

Szycze A., Ho L., Chibowski E. Synthesis of hydroxyapatite for biomedical applications *Adv. Colloid Interface Sci.* 2017. V. 249. P. 321–330. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.04.007>.

Tripathy S., Raichur A. Abatement of fluoride from water using manganese dioxide-coated activated alumina. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. V. 153(3). P. 1043–1051. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.100>.

Zheltova V., Vlasova A., Bobrysheva N., Abdullin I., Semenov V, Osmolowsky M., Voznesenskiy M., Osmolovskaya O. Fe₃O₄@HAp core-shell nanoparticles as MRI contrast agent: synthesis, characterization and theoretical and experimental study of shell impact on magnetic properties. *Applied Surface Science*. 2020. V. 531. 147352. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147352>.

References (translated & transliterated)

VODA PYTNA Vymohy ta metody kontrolyuvannya yakosti DSTU 7525:2014 Vydannya ofitsiyne [DRINKING WATER Requirements and quality control methods DSTU 7525:2014 The publication is official]. [Electronic resource] URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/1-10672-dstu_voda_pytna.pdf (access date 10.10.2023) [in Ukrainian].

Kaminskiy, O.M., Kusiak, N.V., Petranovska, A.L., Turanska, S.P., & Horbyk, P.P. (2013). Vplyv pryrody poverkhni nanostruktur na osnovi odnodomennoho mahnetytu na adsorbtsiyu kompleksiv tsys-dykhlordyaminplatyny (II). [Influence of the nature of the surface of nanostructures based on single-domain magnetite on the adsorption of *cis*-dichlorodiammineplatinum (II) complexes]. *Him. Fiz. Tehnol. Poverhni [Chemistry, Physics and Surface Technology]*, 4(3), 283–292 [in Ukrainian].

Kaminskiy, O.M., Kusiak, N.V., Petranovska, A.L., Abramov, M.V., Turanska, S.P., Horbyk, P.P., & Chahun, V.F. (2013). Adsorbtsiya kompleksiv tsys-dykhlordyaminplatyny nanostrukturamy na osnovi mahnetytu. [Adsorption of *cis*-dichlorodiammineplatinum complexes by magnetite-based

nanostructures]. *Metalofizyka ta novitni tekhnologii. [Metallophysics and the latest technologies]*, 35(3), 389–406 [in Ukrainian].

Abdullah, N.H., Shameli, K., Abdullah, E.Ch., & Abdullah, L.Ch. (2019). Solid matrices for fabrication of magnetic iron oxide nanocomposites: Synthesis, properties, and application for the adsorption of heavy metal ions and dyes *Composites Part B: Engineering*, 162, 538–568. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.075> [in English].

Azeez, N.R., Salih, S.S., Kadhom, M., Mohammed, H.N., & Ghosh, T.K. (2023). Enhanced termination of zinc and cadmium ions from wastewater employing plain and chitosan-modified mxenes: Synthesis, characterization, and adsorption performance *Green Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2023.08.003> [in English].

Baes, Ch.F., & Mesmer, R.E. (1976). The hydrolysis of cations. *Wiley: NJ* [in English].

Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption. [Electronic resource] URL: <https://www.legislation.gov.uk/eudr/2020/2184> (access date 10.10.2023) [in English].

Erdemoğlu, M., & Sarıkaya, M. (2006). Effects of heavy metals and oxalate on the zeta potential of magnetite. *J. Colloid Interface Sci*, 300(2), 795–804. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.04.004> [in English].

Guo, Sh., Jiao, P., Dan, Zh., Duan, N., Zhang, J., Chen, G., & Gao W. (2017). Synthesis of magnetic bioadsorbent for adsorption of Zn(II), Cd(II) and Pb(II) ions from aqueous solution *Chemical Engineering Research and Design*, 126, 217–231. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2017.08.025> [in English].

Onyango, M., Kojima, Y., Aoyi, O., Bernardo, E., & Matsuda, H. (2004). Adsorption equilibrium modeling and solution chemistry dependence of fluoride removal from water by trivalent-cation-exchanged zeolite F-9. *Journal of Colloid and Interface Science*, 279(2), 341–350. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.06.038> [in English].

Pai, Sh., Kini, S., Selvaraj, R., & Pugazhendhi, A. (2020). A review on the synthesis of hydroxyapatite, its composites and adsorptive removal of pollutants from wastewater *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101574. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101574> [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].

Skwarek, E., Janusz, W., & Sternik, D. (2014). Adsorption of citrate ions on hydroxyapatite synthesized by various methods *J Radioanal Nucl Chem*, 299(3), 2027–2036. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2825-z> [in English].

Szce, A., Ho, L., & Chibowski, E. (2017). Synthesis of hydroxyapatite for biomedical applications *Adv. Colloid Interface Sci*, 249, 321–330. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.04.007> [in English].

Tripathy, S., & Raichur, A. (2008). Abatement of fluoride from water using manganese dioxide-coated activated alumina. *Journal of Hazardous Materials*, 153(3), 1043–1051. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.100> [in English].

Zheltova, V., Vlasova, A., Bobrysheva, N., Abdullin, I., Semenov, V., Osmolovsky, M., Voznesenskiy, M., & Osmolovskaya, O. Fe₃O₄@HAp core-shell nanoparticles as MRI contrast agent: synthesis, characterization and theoretical and experimental study of shell impact on magnetic proper ties. *Applied Surface Science*, 531, 147352. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147352> [in English].

Отримано: 11.10.2023

Прийнято: 21.10.2023



УДК 544.654.076.324.2

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.9>

ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ТІАМІНУ БРОМІДУ НА НІКЕЛЕВИХ ГОСТРИЙНИХ СТРУКТУРАХ, МОДИФІКОВАНИХ НАНОРОЗМІРНИМИ ЧАСТИНКАМИ БІСМУТУ

О. П. Шевченко¹, О. А. Лут², Ю. А. Шафорост³, Д. П. Шкуніда⁴

Дослідження хімічних і електрохімічних властивостей вітаміну В₁ дозволяє глибше розкрити механізми обмінних процесів, що проходять у живих організмах людини та тварин. Зразки з модифікованою і (для порівняння) із гладкою поверхнею електрохімічно осадженого бісмуту були використані як робочі електроди. Наноструктуровані металеві електроди були виготовлені методом іонно-плазмового напилення нікелю на поверхню нікелевої пластини, у результаті чого на ній формуються масиви металевих гострих структур типу кластер – глобула – поверхня. Прямолинійна залежність потенціалу відновлення тіамін броміду від логарифма швидкості розгортки свідчить про ускладнення даної гетерогенної реакції адсорбцією деполаризатора. Відсутність анодних максимумів струму, які чітко спостерігаються на катодних ділянках вольтамперограм, вказує на необоротність процесу відновлення тіаміну броміду. Процес відновлення є необоротним, одноелектронним, бо під час окиснення тіаміну електрон буде видалятися із піримідинового фрагмента, а в разі відновлення – приєднуватись до тіазолієвого циклу, тобто

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 магістрантка кафедри хімії та наноматеріалознавства
(Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси)
e-mail: shkunyda.diana2218@vu.cdu.edu.ua
ORCID: 0009-0005-1380-4379

окиснювальний і відновлювальний процеси стосуються різних частин молекули. За проведенням розрахунком вольтамперометричних кривих і відповідними кінетичними рівняннями провели розрахунок величини константи швидкості та коефіцієнта дифузії процесу відновлення тіаміну броміду на наноструктурованому електроді. Розрахована за напівлогіфічною залежністю енергія активації електрохімічного процесу відновлення тіаміну броміду менша порівняно з енергією активації хімічних процесів і може вказувати на суттєвий вплив дифузійних обмежень. Проведені вольтамперометричні дослідження електрохімічного процесу відновлення тіаміну броміду на бісмут-модифікованих електродах на основі гострих структур нікелю показали, що процес розряду деполаризатора на даних електродах в 1,67 інтенсивніше на поверхні електродів з електроосадженим бісмутом. Електродні матеріали показали високу ефективність під час дослідження окисно-відновних властивостей вітамінів групи В.

Ключові слова: тіаміну бромід, необоротність процесу, наноструктурований електрод, електроосадження.

ELECTROCHEMICAL STUDIES OF THIAMINE BROMIDE REDUCTION PROCESS ON NICKEL ACUTE STRUCTURES MODIFIED WITH NANO-SIZED BISMUTH PARTICLES

O. P. Shevchenko, O. A. Lut, Yu. A. Shaforost, D. P. Shkunyda

The study of the chemical and electrochemical properties of Thiamine (B1) allows for a deeper disclosure of the mechanisms of metabolic processes taking place in living organisms of humans and animals.

Samples with a modified and (for comparison) smooth surface of electrochemically precipitated bismuth were used as working electrodes. Nanostructured metal electrodes were made by ion-plasma sputtering of nickel on the surface of a nickel plate, as a result of which arrays of sharp metal structures of the cluster-globule-surface type are formed on it. The straight forward dependence of the reduction potential of thiamine bromide on the logarithm of the sweep velocity indicates the complication of this heterogeneous reaction by adsorption of the depolarizer. The absence of anode current maxima, which are clearly observed in the cathode regions of voltamperograms, indicates the irreversibility of the reduction process of thiamine bromide. The reduction process is irreversible, one-electron, since during the oxidation of thiamine the electron will be removed from the pyrimidine fragment, and during the reduction it will be attached to the thiazole cycle, that is, the oxidative and reducing processes concern different parts of the molecule. According to the calculation of voltammetry curves and the corresponding kinetic equations, the value of the rate constant and the diffusion coefficient of the thiamine bromide reduction process on a nanostructured electrode was calculated. The half-logarithmic activation energy of thiamine bromide electrochemical reduction process is less than the activation energy of chemical processes and may indicate a significant effect of diffusion constraints. The conducted voltammetry studies of the electrochemical process of reduction of thiamine bromide on bismuth-modified electrodes based on the sharp structures of nickel showed that the process of discharge of the depolarizer on these electrodes is 1,67 times more intense on the surface of electrodes with electrodeposited bismuth. Therefore, the electrode materials used have shown high efficiency in the study of the redox properties of B vitamins.

Key words: thiamine bromide, irreversibility of process, nanostructured electrode, electrodeposition.

Вступ

Вітаміни – це низькомолекулярні органічні сполуки, які відіграють досить значну роль у багатьох метаболічних процесах, сприяють нормальному функціонуванню організму навіть у дуже малих кількостях. Вони також мають здатність запобігати прояву дисфункцій або захворювань, які можуть виникнути, коли вони присутні в невеликій кількості або відсутні взагалі. Вітамін В1 (тіамін) є важливим компонентом збалансованого здорового харчування,

і його дефіцит пов'язують із розвитком низки захворювань або патологічних станів, серед яких розвиток аутизму (Luong et. al., 2013), хвороби Альцгеймера (Luong et. al., 2011) та деяких видів раку (Luong et. al., 2013). Дефіцит може виникнути через неправильне харчування або патологічні стани, які порушують нормальне засвоєння. Важливо підтримувати рекомендовану добову норму споживання вітаміну, якої можна досягти за допомогою збалансованої дієти та добавок, якщо це необхідно. Щоб

переконалися, що харчові добавки забезпечують правильне дієтичне споживання, потрібні надійні та швидкі методи аналізу вітамінів у харчових продуктах і добавках.

Вітамін тіамін (B_1) входить до складу таких біологічних речовин, як ферменти. Ферменти, які у своєму складі містять фрагменти тіаміну, виконують значну роль у живих організмах, беручи участь у метаболізмі вуглеводів, жирів, білків і води. Вивчення хімічних і електрохімічних властивостей тіаміну броміду різноманітними методами дає змогу розкрити механізми обмінних процесів, метаболізму, що проходять на рівні клітин у живих організмах людини та тварин (Фармацевтична ..., 2005).

Для проведення кількісних і якісних досліджень тіаміну використовують різноманітні хімічні методи, що базуються на проведенні якісних кольорових реакцій, які є характерними для специфічних груп, що входять до складу вітаміну. Досить часто під час проведення кількісних досліджень використовують титрометричні методи аналізу. Чутливість таких реакцій невелика, порівняно з іншими методами, тому найчастіше вони використовувалися для якісного визначення вітаміну в різних біологічних розчинах. Досить широко під час проведення кількісних досліджень використовують оптичні методи для виявлення вітаміну, наприклад флуорометричний метод. Ці методи не досить селективні, трудомісткі та потребують великих витрат часу для підготовки реагентів, до проведення визначень, значної кількості допоміжних операцій (Hart, 1990).

Зручним методом дослідження окисно-відновних властивостей перенесенням електронів під час проходження біологічних процесів є електрохімічний, де в ролі окисника чи відновника виступає поверхня електрода. Для проведення таких досліджень широко використовують такі різновиди електрохімічних методів аналізу, як вольтамперометричні та полярографічні, у різних проявах.

Вольтамперометрія є поширеним електрохімічним методом дослідження й аналізу органічних сполук, вітамінів також. Успіхи в цій галузі електроаналізу пов'язані з появою нового покоління електродів – хімічно модифікованих електродів. Хімічна модифікація електродної поверхні надає їй особливих властивостей, що сприяють підвищенню чутливості, селективності та відтворюва-

ності методу. Особливу увагу останні роки приділяють електрокаталітично модифікованим електродам.

Свинцевий плівковий електрод був запропонований для визначення неорганічних іонів і органічних сполук. Запропонований електрод продемонстрував такі цікаві характеристики, як: менша токсичність порівняно зі ртутними електродами, широке потенційне вікно та здатність працювати в широкому діапазоні середовищ рН, проста підготовка, хороша відтворюваність і простий спосіб електрохімічного оновлення поверхні. Визначення тіаміну у фармацевтичних препаратах і соках досліджувалось за допомогою адсорбційної вольтамперометрії на скло-вуглецевому електроді, не покритому та покритому плівкою Pb^{2+} , в ацетатному буфері 0,05 моль/дм³ за рН = 5,6. На плівковому електроді з'явився пік відновлення з потенціалом -1,25 В порівняно з електродом Ag/AgCl, тоді як на звичайному електроді пік не спостерігався. Це показало ефективність плівки Pb^{2+} на поверхні скло-вуглецевого електрода. Можливий механізм вказує на те, що тіамін, імовірно, адсорбується на плівку Pb^{2+} , але не на електроді (Tyszczyk-Rotko, 2012).

Електрохімічну поведінку тіаміну вивчали за допомогою методу прямокутної вольтамперометрії на електроді Au у формі Cys/SAM (Cys/SAM/Au) у лужному середовищі (рН = 11,0). Результати показали, що сформований електрод Cys/SAM/Au мав електрокаталітичну активність до процесу окиснення тіаміну, який контролювався адсорбцією. З підвищенням рН (від 7,4 до 11,9) анодний пік зміщувався до більш негативних значень. Цей метод був простим, швидким і селективним високоточним методом визначення тіаміну у присутності інших вітамінів у фармацевтичних препаратах і може бути застосований у клінічному аналізі й аналізі ліків (Wanetal, 2002).

Успішне визначення вітаміну B_1 у суміші вітамінів B_2 і С також було досягнуто за допомогою адсорбційної вольтамперометрії зі скло-вуглецевим електродом, сформованим із твердої срібної амальгамної плівки, що привело до дуже хорошого розподілу піків вітамінів B_1 і С і показало задовільні межі виявлення. Проведені дослідження з використанням електрохімічного біосенсора для виявлення вітаміну B_1 з електрохімічно обробленого багатопшарового пастоподібного електрода, сформованого

з вуглецевих нанотрубок, виявилось ефективним (Brahmanetal, 2013).

Використання вольтамперометричних методів, як відомо, передбачає вимірювання струму робочого електрода як функції прикладеного потенціалу. В електрохімічних процесах робочим електродом є поверхня, на якій відбувається процес окиснення/відновлення. Для створення робочих електродів можна використовувати різноманітні матеріали. Найпоширенішими видами є тверді електроди із благородних металів, електроди з вуглецевих матеріалів і ртутні електроди. Однак через токсичність матеріалів на основі ртуті та підвищену екологічну безпеку було запропоновано речовини, які потенційно можуть замінити ртуть. У цьому контексті плівкові електроди з бісмуту були представлені на початку 2000-х рр. Відтоді бісмутові електроди стали привабливими в електроаналізі головним чином тому, що їхня продуктивність подібна до роботи ртутних електродів. Окрім того, вони є екологічно чистими, оскільки токсичність бісмуту та його солей незначна. Широко були показані аналітичні можливості вольтамперометричного методу у визначенні важких токсичних металів, де як електродні матеріали використовували вуглецеві електроди, які модифікували плівкою бісмуту. Оцінювання можливостей застосування бісмут-модифікованих електродів у різних їх різновидах, за допомогою різноманітних методів одержання, як хімічних, так і електрохімічних, в аналізі органічних сполук у науковій літературі трапляється не досить часто. Були проведені й описані дослідження поведінки бісмут-модифікованого електрода під час визначення вітаміну В₂ в деяких фармацевтичних препаратах. Як фоновий розчин використовували розчини Бріттона – Робінса, що містив оцтову, ортофосфорну та борну кислоти (по 0,04 М) у бідистильованій воді.

Альтернативним шляхом підвищення активності та селективності електродних матеріалів є надання їхній поверхні нових енергетичних і каталітичних властивостей створенням наноструктурованих гострих або кластерних систем із використанням менш вартісних, доступних матеріалів. Проведені попередні дослідження на металевих електродах нікелю типу кластер – глобула – поверхня, модифікованих металічними нанорозмірними частинками, цілком придатні для ефективного відновлення

органічних речовин, зокрема і водорозчинних вітамінів (Shevchenko et al., 2011; Мінаєв та ін., 2021).

Можливості застосування бісмут-наноструктурованих електродів, одержаних на основі гострих структур нікелю, для проведення дослідження електрохімічних окисно-відновних процесів стосовно водорозчинних вітамінів групи В у науковій літературі практично не описано. У зв'язку із цим нами проведено дослідження поведінки бісмут-наноструктурованого електрода під час електрохімічного відновлення вітаміну В₁. Проведені попередні дослідження показали, що на наноструктурованих електродах електрохімічні процеси окиснення та відновлення проходять на вершинах кластерних елементів наноструктурованої поверхні, де робота виходу електронів практично рівна нулю. Бісмут був нанесений на кластерні вершини елементів наноструктурованої поверхні нікелю. Бісмут вибрали тому, що він належить до металів із середнім значенням величини перенапрути виділення водню. Це дозволяє використовувати даний електрод у широкому діапазоні катодної розгортки потенціалів, оскільки органічні деполаризатори мають значні катодні потенціали розряду (Шевченко та ін., 2010).

Мета роботи – за допомогою бісмут-модифікованого електрода на основі гострих структур нікелю провести дослідження електрохімічного процесу відновлення тіаміну броміду, розрахувати основні кінетичні характеристики досліджуваного процесу. Під час проведення досліджень використали вольтамперометричний метод із лінійною та циклічною розгорткою потенціалу.

Матеріал і методи

У роботі використовували потенціодинамічно-вольтамперометричний комплекс на базі потенціостата ПИ-50-1 та програматора ПР-8.

Схема потенціодинамічно-вольтамперометричного комплексу наведена на рис. 1.

Зразки з модифікованою і (для порівняння) із гладкою поверхнею електрохімічно осадженого бісмуту були використані як робочі електроди. Наноструктуровані металеві електроди були виготовлені методом іонно-плазмового наплення нікелю на поверхню нікелевої пластини, у результаті чого на ній формуються масиви металевих гострих структур типу кластер – глобула – поверхня. Отримані зразки являли собою металеву платформу завтовшки

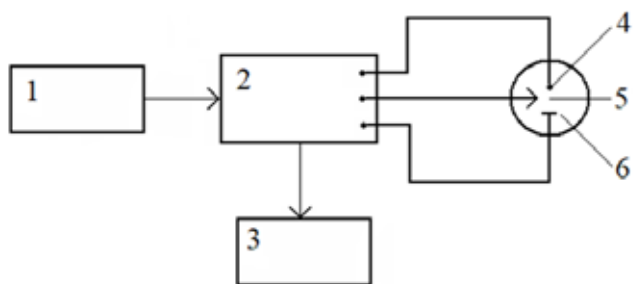


Рис. 1. Принципова схема потенціодинамічно-вольтамперометричного комплексу: 1 – програматор ПР-8; 2 – потенціостат ПИ-50-1; 3 – комп'ютер; 4 – робочий електрод; 5 – електрод порівняння; 6 – допоміжний електрод

$5 \cdot 10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-3}$ м, на поверхні якої розміщені конусоподібні металеві елементи (рис. 2).

Згідно з даними сканувальної електронної мікроскопії (далі – СЕМ), отриманими за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМ-100У, геометричні розміри цих елементів практично повторюються на поверхні одного масиву, їхні вершини розташовані паралельно одна щодо одної, водночас однакові заввишки. Конуси не мають дефектів у вигляді загинів чи горизонтальних площадок на вершинах, мають гладку (дзеркальну) бічну поверхню з висотою та радіусом заокруглення вершини 50 нм.

Елементи масивів жорстко закріплені на платформі та становлять із нею цілісну структуру. Поверхнева концентрація елементів масиву становить 10^9 м⁻².

Електрохімічні дослідження проводили у скляній триелектродній комірці, де робочим електродом були наноструктуровані нікелеві електроди, вершини яких були покриті мікрокількостями бісмуту, із пло-

щею поверхні 0,24 см². Конусоподібна форма гостряка забезпечує на вершині найбільший коефіцієнт підсилення електричного поля. Наноструктуровані електроди мають дуже велику стійкість до термічного нагрівання за різних температур у струментах водню та хімічного травлення у водних розчинах кислот (Мінаєв та ін., 2021). Катодний і анодний простір комірки не розділені діафрагмою. Під час дослідження робочий електрод (1) слугував катодом, який перебував у комірці в горизонтальному положенні.

Допоміжним електродом слугувала пластинка платинованої платини з видимою поверхнею $7 \cdot 10^{-4}$ м². Колоїдну платину осаджували електролітичним шляхом із насиченого розчину платинату калію. Це давало змогу під час накладання струму поляризувати лише робочий електрод, площа якого була набагато менша за площу допоміжного. Допоміжний електрод у комірці перебував у вертикальному положенні.

Електрод порівняння – насичений аргентум-хлоридний. Як джерело живлення використовували потенціостат ПИ-50-1.1 із програматором ПР-8, поляризаційні та циклічні криві реєстрували за допомогою комп'ютерної програми Science Plotter. Потенціал робочого електрода змінювався за лінійним законом у діапазоні $E = 0 \div -1,6$ В, швидкість розгортки потенціалу (v) становила $0,01 \div 0,2$ В/с. Дослідження проводились без примусового перемішування розчину за температури 293 ± 3 К. Для видалення атмосферного кисню з розчину перед кожним дослідженням протягом 10–15 хвилин через комірку барботували очищений аргон. Основні кінетичні константи (кое-



а



б

Рис. 2. Наноструктурована поверхня нікелевих електродів типу кластер – глобула, де вершини масивів покриті бісмутом: загальний вигляд нікелевих електродів (електронна мікрофотографія (x 1 400)) (а); окремі елементи поверхні масивів гострих структур (x 14 300) з висотою та радіусом заокруглення вершини 50 нм (б)

фіцієнт дифузії, константа швидкості та діагностичний критерій Семерано) електрохімічного процесу відновлення тіаміну броміду розраховували за відомими рівняннями електрохімічної кінетики (Зінчук та ін., 2008). Розчини тіаміну броміду марки х.ч. готували на 0,5М розчині натрій перхлорату, який використовували як фон. Кристалічний тіаміну бромід – це безбарвні голки, температура плавлення становить 522–523 К. Тіамін добре розчиняється у воді та льодяній оцтовій кислоті, дещо слабше в метиловому й етиловому спирті. Тіамін осаджується фосфорно-вольфрамовою та пікриновою кислотами та солями важких металів. Будучи первинним аміном, тіамін володіє властивостями електролітів (Gu et al., 2001). Молекула тіаміну складається із двох компонентів – похідного піримідину та похідного тiazолу. Розчин фону готували на бідистильованій воді.

Результати та обговорення

Проведення електрохімічних досліджень окисно-відновних процесів органічних речовин дозволяє отримати дані про механізм проходження процесів, визначати кінетичні параметри процесів, зокрема встановлювати величини констант швидкості, коефіцієнтів дифузії, енергії активації, кількості електронів, що беруть участь в електрохімічному процесі. Дані дослідження дозволяють встановлювати чинники, які забезпечують високий вихід кінцевого продукту, добиватися значної селективності процесів. Вирішальну роль у цьому відіграє природа електрода, стан його поверхні, каталітичні властивості.

Проведені вольтамперометричні дослідження процесу відновлення тіаміну броміду показали, що на катодних ділянках одержаних потенціодинамічних кривих, на відміну від фонові кривої, спостерігаються чітко виражені максимуми струму в області потенціалів – 1,20 В, щодо аргент-хлоридного електрода порівняння. Потенціал напівхвилі відповідно – 1,06 В. Природа одержаного катодного максимуму струму пов'язана саме з розрядом деполяризатора, тому що його величина залежить від концентрації тіаміну броміду в досліджуваному розчині. Зростання концентрації вітаміну призводить до зміщення значень потенціалів максимумів у негативний бік, що вказує на зростання енергії активації електрохімічної реакції. Це пов'язано, на нашу думку, з тим, що продукт відновлення тіаміну броміду

досить інтенсивно адсорбується поверхнею електрода (рис. 3).

Величина максимумів струму прямо пропорційно залежать від концентрації тіаміну броміду в розчині, а це вказує на те, що вольтамперометричний метод може бути застосований для кількісних визначень деполяризатора в досліджуваному розчині. Змінні величини y і x мають пропорційний характер, функціональна залежність між ними виражається таким рівнянням: $y = K \cdot x$, де K – коефіцієнт пропорційності. Цей коефіцієнт визначали за тангенсом кута нахилу прямої (рис. 4). За нашими підрахунками, K для наноструктурованого бісмутового електрода – 1,3. Отже, рівняння, яке зв'язує

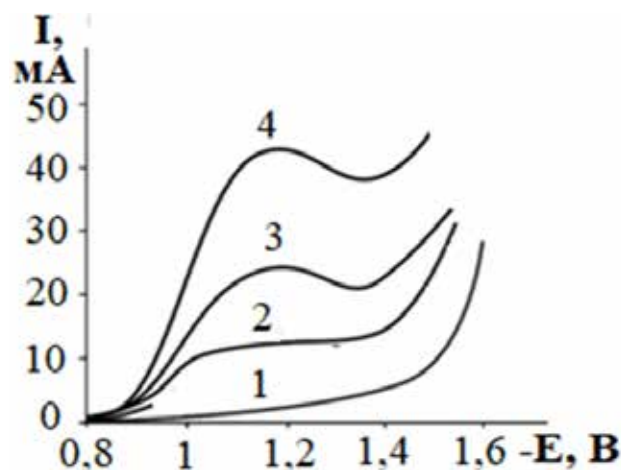


Рис. 3. Вольтамперні криві відновлення тіаміну броміду на фоні 0,5 М розчину натрію перхлорату (рН = 6,8, $v = 0,05$ В/с, $T = 293$ К). Концентрація тіаміну броміду: фонові крива (1); 0,005 М (2); 0,0075 М (3); 0,01 М (4); 0,02 М (5)

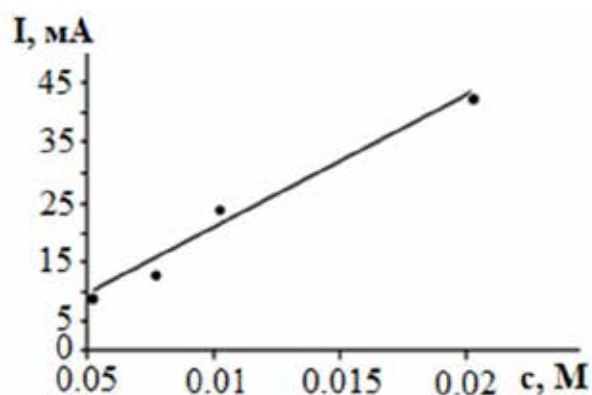


Рис. 4. Залежність струму катодного максимуму від концентрації деполяризатора в розчині (рН = 6,8, $v = 0,05$ В/с, $T = 293$ К)

величину максимуму струму з концентрацією деполяризатора, має вигляд: $I = 1,3 \cdot C$.

Відновлення деполяризатора є необоротним одноелектронним процесом, це зумовлено тим, що під час окиснення молекули тіаміну електрон буде покидати піримідиновий цикл, а в разі відновлення – приєднуватись до тiazолієвого фрагмента, тобто окисно-відновний процес проходять на різних частинах молекули, які ізольовані метиленовою містковою групою. У проходженні даного процесу задіяні лише π -системи, що є типовим для більшості органічних полярних молекул із π -електронами. Для підтвердження числа електронів, що беруть участь в електродному процесі, також розраховували їх кількості за відомим рівнянням граничного струму Левіча, розрахунок становив 1,08. Що підтверджує одноелектронний процес розряду деполяризатора

Вплив швидкості розгортки потенціалу на електрохімічний процес відновлення вітаміну В1 досліджували методом циклічної вольтамперометрії. Як видно з рис. 5, із зростанням швидкості розгортки потенціалу потенціал максимуму процесу відновлення деполяризатора стає більш негативним, що підтверджує наявність кінетичних обмежень електрохімічної реакції. Така поведінка деполяризатора пов'язана зі значною його адсорбційною здатністю.

Відсутність анодних максимумів струму, які чітко спостерігаються на катодних ділянках вольтамперограм, вказує на необоротність процесу відновлення тіаміну броміду, отже, продукт реакції електрохімічно не активний у діапазоні потенціалів зворот-

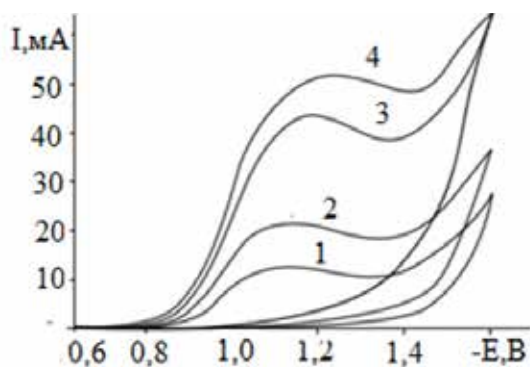


Рис. 5. Циклічні вольтамперометричні криві відновлення тіаміну броміду на наноструктурованій поверхні бісмуту. Фон – 0,5 М розчин натрій перхлорату (рН = 6,8; $C = 0,02$ М; $T = 293$ К) за швидкості розгортки, v : 0,01 (1); 0,02 (2); 0,05 (3); 0,1 В/с (4)

ної розгортки потенціалів. На необоротність процесу вказує і менший за одиницю діагностичний критерій Семерано ($X_v = 0,5$), розрахований за даними розрахунку вольтамперної кривої. Зменшення сили струму максимумів на циклічних вольтамперних кривих за однакової швидкості накладання потенціалу пов'язане з поступовою дезактивацією поверхні електрода. Таке явище характерне для необоротних процесів, які ускладнюються процесами адсорбції. Процес активації поверхні електродів може відбуватись за почергової катодної й анодної поляризації електрода, що є більш характерним для оборотних процесів.

Отримані експериментальні залежності $E_{\max} - \lg v$, $E_{\max} - v^{1/2}$ – лінійні, що характерне для необоротних процесів (рис. 6).

Окрім того, графічні залежності висоти піку максимуму струму (I_p) від квадратного кореня зі швидкості розгортки потенціалу ($v^{1/2}$) виявилися лінійними в інтервалі 5–150 мВ. Це може бути ознакою наявності дифузійних обмежень у процесах електровідновлення тіаміну броміду, коли реакція лімітується не тільки стадією перенесення електрона, але й дифузійною деполяризатора до поверхні електрода. Прямолінійна залежність потенціалу відновлення тіаміну броміду від логарифма швидкості розгортки свідчить про ускладнення даної гетерогенної реакції адсорбцією деполяризатора (Aboul-Kasim, 2000). Отже, отримані закономірності дозволяють застосувати для розрахунку кінетичних параметрів процесу електровідновлення тіаміну броміду рівняння для необоротних електрохімічних процесів.

Відомо (Oni et al., 2002), що загалом швидкість хімічних реакцій, зокрема й елек-

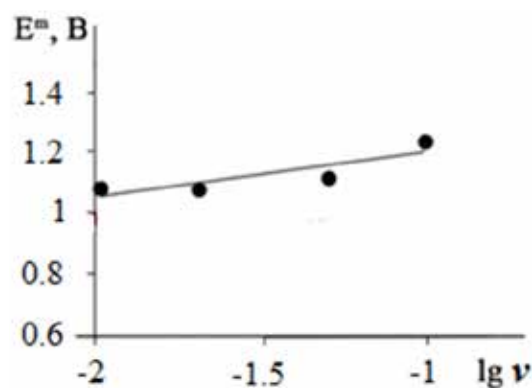


Рис. 6. Залежність потенціалів максимумів струму відновлення деполяризатора від логарифма швидкості розгортки потенціалу: (рН = 6,8; $C = 0,5 \cdot 10^{-2}$ М)

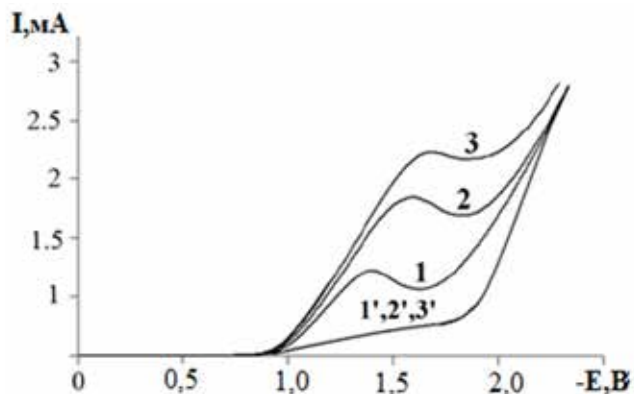


Рис. 7. Залежність сили струму катодного максимуму від температури досліджуваного розчину: (рН = 6,8; $\nu = 0,05$ В/с; $C = 0,5 \cdot 10^{-2}$ М) 293 К (1); 303 К (2); 313 К (3)

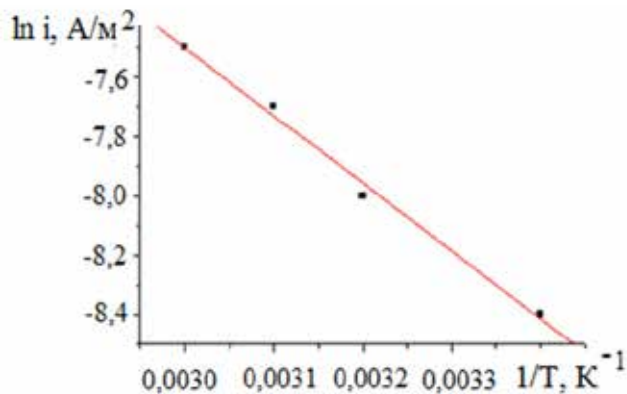


Рис. 8. Напівлогарифмічна залежність густини струмів максимумів електрохімічного процесу відновлення тіаміну броміду від оберненої температури (рН = 6,8; $\nu = 0,05$ В/с; $C = 0,5 \cdot 10^{-2}$ М)

Таблиця 1

Експериментально одержані кінетичні параметри процесу електрохімічного відновлення тіаміну броміду

Деполаризатор	Константа швидкості, k_s (см \cdot с $^{-1}$)	Коефіцієнт дифузії, D (см 2 /с)
Тіаміну бромід	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$5,8 \cdot 10^{-6}$

трохімічного відновлення вітамінів, з підвищенням температури зростає. За нашими результатами, підвищення температури веде до зростання сили струму максимумів на одержаних вольтамперних кривих і константи швидкості гетерогенного процесу, яка прямо пропорційно залежить від величини сили чи густини струму (рис. 7).

Зростання температури на кожні 10 градусів призводить до зростання сили струму максимумів в 1,4–1,6 раза на вольт амперних кривих. Водночас відбувається зміщення потенціалу розряду вітаміну В₁ у катодну область майже на 200 мВ. Така закономірність перебігу кривих зумовлена зниженням адсорбуючої здатності тіаміну броміду в разі підвищення температури (див. рис. 7).

За проведеним розрахунком вольтамперометричних кривих і відповідними кінетичними рівняннями провели розрахунок величини константи швидкості та коефіцієнта дифузії процесу відновлення тіаміну броміду на наноструктурованому електроді (табл. 1).

Відомо, що зміна енергії активації E_a електрохімічного процесу залежить від

потенціалу електрода, який, у свою чергу, теж є залежним від температури, згідно з рівнянням Нернста (Ковальчук та ін., 2007). Тому можна говорити лише про «уявну» величину ΔE_a як характеристику процесу за визначеного потенціалу робочого електрода.

Розрахована за напівлогарифмічною залежністю $\ln i - 1/T$ енергія активації електрохімічного процесу відновлення тіаміну броміду становить $\Delta E_a = 37,4 \pm 0,2$ кДж/моль, що менше порівняно з енергією активації хімічних процесів і може вказувати на суттєвий вплив дифузійних обмежень (рис. 8).

Висновки

Отже, проведені вольтамперометричні дослідження електрохімічного процесу відновлення тіаміну броміду на бісмут-модифікованих електродах на основі гострійних структур нікелю показали, що процес розряду деполаризатора на даних електродах в 1,67 раза інтенсивніше на поверхні електродів з електроосадженим бісмутом. Отже, використані електродні матеріали показали високу ефективність під час дослідження окисно-відновних властивостей вітамінів групи В, зокрема й тіаміну броміду.

Список використаної літератури

Зінчук В.К., Левицька Г.Д., Дубенська Л.О. Фізико-хімічні методи аналізу. Навчальний посібник. Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2008. 362 с.

Ковальчук Є.П., Решетняк О.В. Фізична хімія. Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2007. 800 с.

Мінаєв Б.П., Аксєментьєва О.І., Лут О.А., Шевченко О.П., Погребняк О.С., Електрохімічне окиснення саліцилової кислоти на наноструктурованих електродах на основі нікелю з додатково осадженою платиною. Питання хімії та хімічної технології. 2021. № 2. С. 73–80.

Фармацевтична енциклопедія. Київ : Моріон, 2005. 848 с.

Шевченко О.П., Лут О.А., Аксєментьєва О.І. Наноструктуровані металеві поверхні як електродні матеріали при дослідженні електровідновлення органічних кислот. Вісник Черкаського університету. Серія: Хімічні науки. 2010. Вип. 174. С. 111–116.

Aboul-Kasim E. Anodic adsorptive voltammetric determination of the vitamin B1 (thiamine). *J Pharm Biomed Anal.*, 2000). V. 22(6). 1047–1054. [https://doi.org/10.1016/s0731-7085\(99\)00154-5](https://doi.org/10.1016/s0731-7085(99)00154-5).

Brahman P.K., Dar R.A., Pitre, K.S. DNA-functionalized electrochemical biosensor for detection of vitamin B1 using electrochemically treated multiwalled carbon nanotube paste electrode by voltammetric methods. *Sens. Actuators B Chem*, 2013. V. 177. P. 807–812. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.11.073>.

Gu H., Yu A., Chen H.. Electrochemical behavior and simultaneous determination of vitamin B2, B6, and C at electrochemically pretreated glassy carbon electrode. *Anal Lett*, 2001. V. 34. P. 2361–2374. <http://dx.doi.org/10.1081/AL-100107301>.

Hart J.P. Electroanalysis of biologically important compounds. Ellis Horwood Limited. Hemel Hempstead, UK, 1990. Chapter 4. P. 137–191.

Luong K.V.Q., Nguyễn L.T.H., Role of thiamine in Alzheimer's disease. *Am. J. Alzheimer's. Dis Other Dement*, 2011. V. 26. P. 588–598. <https://doi.org/10.1177/1533317511432736>.

Luong K.V.Q., Nguyễn L.T.H. The role of thiamine in autism. *J Psychiatry Neurosci*, 2013. V. 1. P. 22–37. <http://dx.doi.org/10.11648/j.ajpn.20130102.11>.

Luong, K.V.Q., Nguyễn, L.T.H. The role of thiamine in cancer: Possible genetic and cellular signalling mechanisms. *Cancer Genom Proteom*, 2013. V. 10. P. 169–185.

Oni, J., Westbroek, P., Nyokong, T. Voltammetric Detection of Vitamin B1 at Carbon Paste Electrodes and Its Determination in Tablets. *Electroanalysis*, 2002, V. 14(17). P. 1165–1168. [https://doi.org/10.1002/1521-4109\(200209\)14:17%3C1165::aid-elan1165%3E3.0.co;2-s](https://doi.org/10.1002/1521-4109(200209)14:17%3C1165::aid-elan1165%3E3.0.co;2-s).

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. V. 2 (8). P. 69–73.

Tyszczyk-Rotko, K. New voltammetric procedure for determination of thiamine in commercially available juices and pharmaceutical formulation using a lead film electrode. *Food Chem*, 2012. V. 134. P. 1239–1243. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.03.017>.

Wan Q., Yang N., Ye Y. Electrochemical behavior of thiamine on a self-assembled gold electrode and its square-wave voltammetric determination in pharmaceutical preparations. *Anal Sci*, 2002. V. 18. P. 413–416. <https://doi.org/10.2116/analsci.18.413>.

References (translated & transliterated)

Zinchuk, V.K., Levycjka, Gh.D., & Dubensjka, L.O. (2008). *Fizyko-khimichni metody analizu. Navchalnyj posibnyk* [Physical and chemical methods of analysis. Study guide]. Lviv: Ivan Franko National University of Lviv Publishing Centre [in Ukrainian].

Kovaljchuk, Je.P., & Reshetnjak, O.V. (2007). *Fizychna khimija* [Physical chemistry]. Publishing Centre of Ivan Franko National University of Lviv [in Ukrainian].

Minajev, B.P., Aksementjeva, O.I., Lut, O.A., Shevchenko, O.P., & Pogrebnjak, O.S. (2021). Elektrokhimichne okysnennja salicylovoji kysloty na nanostrukturovanykh elektrodakh na osnovi nikelju z dodatkovu osadzenoju platynoju [Electrochemical oxidation of salicylic acid on nanostructured nickel-based electrodes with additional platinum deposition]. *Pytannja khimiji ta khimichnoji tekhnologiji* [Issues of chemistry and chemical technology]. 2, 73–80 [in Ukrainian].

Farmaceutychna encyklopedija. [Pharmaceutical encyclopedia]. K.: Morion (2005) [in Ukrainian].

Shevchenko, O.P., Lut, O.A. & Aksimentjeva, O.I. (2010). Nanostrukturovani metalevi pov-erkhni jak elektrodni materialy pry doslidzhenni elektrovodnvlennja orghanichnykh kyslot. [Nanostructured metal surfaces as electrode materials in the study of electrowinning of organic acids.] *Cherkasy: Visnyk Cherkasjkogho univrsytetu. [Cherkasy: Bulletin of Cherkasy University]. Cerija: Khimichni nauky. [Series: Chemical sciences].* 174, 111–116 [in Ukrainian].

Aboul-Kasim, E. (2000). Anodic adsorptive voltammetric determination of the vitamin B1 (thiamine). *J Pharm Biomed Anal.* 22 (6), 1047–1054. [https://doi.org/10.1016/s0731-7085\(99\)00154-5](https://doi.org/10.1016/s0731-7085(99)00154-5) [in English].

Brahman, P.K., Dar, R.A., & Pitre, K.S. (2013). DNA-functionalized electrochemical biosensor for detection of vitamin B1 using electrochemically treated multiwalled carbon nanotube paste electrode by voltammetric methods. *Sens. Actuators B Chem.* V. 177. 807–812. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.11.073> [in English].

Gu, H.-Y., Yu, A., & Chen, H.-Y. (2001). Electrochemical behavior and simultaneous determination of vitamin B2, B6, and C at electrochemically pretreated glassy carbon electrode. *Anal Lett.* V. 34. P. 2361–2374. <http://dx.doi.org/10.1081/AL-100107301> [in English].

Hart, J.P. (1990). Electroanalysis of biologically important compounds. Ellis Horwood Limited. Hemel Hempstead, UK. Chapter 4. P. 137–191 [in English].

Luong, K.V.Q., & Nguyễn, L.T.H. (2011). Role of thiamine in Alzheimer's disease. *Am. J. Alzheimer's Dis Other Dement.* V. 26. P. 588–598. <https://doi.org/10.1177/1533317511432736> [in English].

Luong, K.V.Q., & Nguyễn, L.T.H. (2013). The role of thiamine in autism. *J Psychiatry Neurosci.* V. 1. P. 22–37. <http://dx.doi.org/10.11648/j.ajpn.20130102.11> [in English].

Luong, K.V.Q., & Nguyễn, L.T.H. (2013). The role of thiamine in cancer: Possible genetic and cellular signalling mechanisms. *Cancer Genom Proteom.* V. 10. P. 169–185 [in English].

Oni, J., Westbroek, P., & Nyokong, T. (2002). Voltammetric Detection of Vitamin B1 at Carbon Paste Electrodes and Its Determination in Tablets. *Electroanalysis.* V. 14(17). P. 1165–1168. [https://doi.org/10.1002/1521-4109\(200209\)14:17%3C1165::aid-elan1165%3E3.0.co;2-s](https://doi.org/10.1002/1521-4109(200209)14:17%3C1165::aid-elan1165%3E3.0.co;2-s) [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.* V. 2 (8). P. 69–73 [in English].

Tyszczyk-Rotko, K. (2012). New voltammetric procedure for determination of thiamine in commercially available juices and pharmaceutical formulation using a lead film electrode. *Food Chem.* V.134. P. 1239–1243. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.03.017> [in English].

Wan, Q., Yang, N., & Ye, Y. (2002). Electrochemical behavior of thiamine on a self-assembled gold electrode and its square-wave voltammetric determination in pharmaceutical preparations. *Anal Sci.* V. 18. P. 413–416. <https://doi.org/10.2116/analsci.18.413> [in English].

Отримано: 21.09.2023

Прийнято: 16.10.2023



УДК 541.122

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.10>

ТЕРМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ І ФАЗОВІ РІВНОВАГИ У СПЛАВАХ СИСТЕМИ Pb – Yb

В. А. Шевчук¹, Л. О. Романова², В. Г. Кудін³, В. С. Судаєвцова⁴

Для розроблення найбільш раціональних методів отримання та застосування сплавів і лігатур визначеного складу необхідна точна інформація про їхні термодинамічні характеристики та фазові рівноваги в них. Методом ізопериболічної калориметрії встановлено парціальні й інтегральні ентальпії змішування розплавів системи Pb – Yb у всьому діапазоні в інтервалі температур 1 100–1 200 К. Установлено, що утворення супроводжується виділенням великої кількості теплоти: мінімальна ентальпія змішування розплавів дорівнює $-45,4 \pm 0,8$ кДж/моль і припадає на розплав із $x_{Pb} = 0,4$ за $T = 1\,200 \pm 3$, згідно з даними діаграми стану досліджуваної системи. За допомогою моделі ідеального асоційованого розчину (IAP) оптимізовано та проведено розрахунки всіх термодинамічних властивостей (енергія Гіббса, ентальпія й ентропія утворення) розплавів, асоціатів у розплавах та інтерметалідів системи Pb – Yb. Показано, що максимальна мольна частка асоціату YbPb досягає значення 0,75, а Yb₂Pb, YbPb₂ – 0,59 і 0,28 відповідно. Активності компонентів у розплавах системи Pb – Yb мають дуже значні від'ємні відхилення від ідеальних розчинів, що корелює з установленими нами термохімічними властивостями.

¹ провідний інженер

(Інститут проблем матеріалознавства імені І. М. Францевича Національної академії наук України, м. Київ)

e-mail: 1975vla1975@ukr.net

ORCID: 0000-0003-4345-4646

² кандидат хімічних наук,

завідувач лабораторії

(Інститут проблем матеріалознавства імені І. М. Францевича Національної академії наук України, м. Київ)

e-mail: larisa_romanova@ukr.net

ORCID: 0009-0004-8897-8253

³ кандидат фізико-математичних наук, доцент

(Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ)

e-mail: kudin@univ.kiev.ua

ORCID: 0000-0003-2557-1523

⁴ доктор хімічних наук, професор

(Інститут проблем матеріалознавства імені І. М. Францевича Національної академії наук України, м. Київ)

e-mail: sud.materials@ukr.net

ORCID: 0009-0003-5465-5272

Розрахунки на основі моделі ІАР також дозволили встановити, що значення $\Delta\bar{H}_{Yb}^{\infty}$ у розплавах системи Pb – Yb з підвищенням температури зростають незначно, а $\Delta\bar{H}_{Yb}^{\infty}$ – більш суттєво. Згідно з моделлю ІАР було проведено розрахунки температурно-концентраційної залежності енергій Гіббса, а також ентальпії і ентропії утворення розплавів та інтерметалідів, що дали змогу встановити координати кривої ліквідусу діаграми стану досліджуваної системи. Розраховані й експериментальні дані добре узгоджуються одне з одним. У результаті отримано детальну інформацію щодо термодинамічних властивостей усіх фаз і фазових рівноваг у сплавах, а саме: було виконано термодинамічний опис системи Pb – Yb.

Ключові слова: метод калориметрії, розплави, інтерметаліди, термодинамічні властивості, Yb, Pb, модель ідеального асоційованого розчину, фазові рівноваги.

THERMODYNAMIC PROPERTIES AND PHASE EQUILIBRIA IN ALLOYS OF THE SYSTEM PB – YB

V. A. Shevchuk, L. O. Romanova, V. H. Kudin, V. S. Sudavtsova

To develop the most rational methods of obtaining and using alloys and ligatures of a certain composition, accurate information about their thermodynamic characteristics and phase equilibria in them is necessary. The method of isoperibolic calorimetry determined the partial and integral enthalpies of mixing of melts of the Pb – Yb system in the entire range of composition in the temperature range of 1 100–1 200 K. It was established that they are formed with the release of a large amount of heat: the minimum enthalpy of mixing of melts is $-45,4 \pm 0,8$ kJ/mol and corresponds to a melt with $x_{Pb} = 0,4$ at $T = 1\ 200 \pm 3$, with data from the state diagram of the studied system. All thermodynamic properties (Gibbs energy, enthalpy, and entropy of formation) of melts, associates in melts, and intermetallics of the Pb – Yb system were optimized and calculated using the ideal associated solution (IAS) model. The calculated activities of the components in the melts of this system show large negative deviations from ideal solutions. Calculations based on the IAS model also made it possible to establish that the values in the melts of the Pb – Yb system increase slightly with increasing temperature, but $\Delta\bar{H}_{Yb}^{\infty}$ more significantly. According to the IAS model, the temperature-concentration dependences of Gibbs energies, enthalpies and entropies of the formation of melts and intermetallics were calculated, from which the coordinates of the liquidus curve of the state diagram of the studied system were obtained. The calculated and experimental data agree well with each other. As a result, complete information on the thermodynamic properties of all phases and phase equilibria in alloys was obtained, that is, a thermodynamic description of the Pb – Yb system was made.

Key words: method calorimetry, melts, intermetallics, thermodynamic properties, Yb, Pb, ideal associated solution model, phase equilibria.

Вступ

Термодинамічні властивості розплавів і сполук необхідні для уточнення діаграм стану систем і науково обґрунтованого отримання нових матеріалів, а також для перевірки точності різних моделей і визначення напряму перебігу технологічних процесів. Гірше за аналоги IV-підгрупи вивчені сполуки рідкісноземельні метали (далі – РЗМ) із свинцем – плюмбідиди. Це може бути зумовлено як експериментальною складністю дослідження реакційно здатних сплавів систем Pb – РЗМ, так і відсутністю в них важливих у прикладному відношенні властивостей, хоча деякі властивості сполук РЗМ із свинцем мають надпровідні властивості, як-от плюмбідиди самарію та лантану (Савицький та ін., 1977; Gambino et al., 1968).

Однак температури переходу їх у надпровідний стан занадто низькі та не можуть відповідати практичним потребам на сучасному рівні. Це ще зумовлюється слабкою стійкістю цих сполук до дії вологи, кисню повітря, їх підвищеною крихкістю. Тому сподіватися на негайне широке застосування плюмбідидів рідкісноземельних металів натепер не доводиться. Проте можна очікувати, що сплави на основі рідкісноземельних металів і свинцю знайдуть своє застосування в багатокомпонентних композиціях.

Мета нашого дослідження – уперше встановити парціальні ентальпії змішування розплавів системи Pb – Yb за допомогою методу ізопериболічної калориметрії за температур 1 100–1 200 К у всьому інтервалі складів; згідно з результатами дослідження

створити термодинамічну модель, що описує власні та літературні експериментальні дані щодо термохімічних властивостей усіх фаз, а також провести розрахунки координат кривої ліквідусу діаграми стану цієї системи за ІАР.

Система Yb – Pb – одна з небагатьох систем РЗМ-р-елемент IV групи, для якої є дані з термодинамічних властивостей у твердому та рідкому станах у всій області концентрацій. Методом вимірювання тиску пари в температурному інтервалі 743–1 373 К ефузійним методом Кнудсена з мас-спектрометром у (Schiffman, 1982) вивчені ентальпії утворення проміжних фаз. Склад еквіатомної сполуки визначено як YbPb_{1,04}. Найбільш детально дослідження термодинамічних властивостей сплавів системи Yb – Pb проведено в (Sommer et al., 1995) методами калориметрії прямого синтезу (сполуки) і високотемпературної калориметрії розчину (розплави). Визначені ентальпії утворення за 300 К плюмбідів Yb₂Pb, Yb₅Pb₃, YbPb, YbPb₃ і ентальпії змішування в температурному інтервалі 960–1 100 К.

Виміряні у 3 значення ентальпій утворення YbPb₃ в межах оцінених похибок узгоджуються зі значенням, визначеним раніше для цієї сполуки методом диференційної калориметрії в (Palenzona & Cirafici, 1973), що свідчить про надійність отриманих результатів для цієї сполуки. Наведена в (Sommer et al., 1995) концентраційна залежність ентальпій утворення сполук $\Delta_f H = f(x_{Pb})$ добре узгоджується з побудованою діаграмою стану системи Yb – Pb, злами на кривій спостерігаються за складів, що відповідають складам конгруентно плавких сполук. Водночас у складах, що відповідають сполукам Yb₅Pb₃ (37,5% (ат.) Pb) і Yb₃₁Pb₂₀ (39,2% (ат.) Pb), видимих зламів не виявлено. Отже, можна зробити висновок, що в (Sommer et al., 1995) дають достовірні значення ентальпій утворення плюмбідів ітербію.

Для конгруентно плавких сполук у (Borzzone et al., 1993) визначені теплотності, які можуть бути апроксимовані такими рівняннями (Дж/моль К):

$$Yb_2Pb \text{ (323-823 K)}, c_p = 18,0 + 6,94 \cdot 10^{-3} \cdot T, \quad (1)$$

$$YbPb \text{ (353-763 K)}, c_p = 20,4 + 9,82 \cdot 10^{-3} \cdot T, \quad (2)$$

$$YbPb_3 \text{ (323-823 K)}, c_p = 20,5 + 6,37 \cdot 10^{-3} \cdot T \quad (3)$$

Ентальпії плавлення плюмбідів ітербію визначені в (Sommer et al., 1995) і ста-

новлять (кДж/г ат.): $10,2 \pm 1,5$ для Yb₂Pb, $10,0 \pm 2,0$ для YbPb і $15,5 \pm 1,2$ для YbPb₃. Значення ентальпії плавлення останнього плюмбиду за даними (Palenzona et al., 1973) трохи нижче і становить $13,7 \pm 2,0$ кДж/моль ат., що в межах похибки узгоджується з даними (Sommer et al., 1995).

Термодинамічні властивості рідких сплавів Yb – Pb дослідили в (Sommer et al., 1995; Borzzone et al., 1993). У роботі (Буланова та ін., 2001) методом вимірювання ЕРС (електрорушійної сили) вивчені розбавлені розчини та розраховані термодинамічні характеристики ітербію в рідкому свинці. Концентраційна залежність коефіцієнта активності ітербію в (Буланова та ін., 2001) визначається рівнянням (кДж/моль ат.):

$$RT \ln \gamma_{Yb} = -208,1x_{Pb}^2 + 191,0x_{Pb}^3 - 16,8x_{Pb}^4. \quad (4)$$

Розраховані за рівнянням (4) значення γ_{Yb} за 973 К свідчать про значні від'ємні відхилення від ідеальної поведінки ($\gamma_{Yb} = 0,027$ за $x_{Pb} = 0,5$) системи Yb – Pb.

Ентальпії змішування рідких сплавів Yb – Pb визначені в інтервалі 960–1 100 К в (Sommer et al., 1995).

За допомогою власних експериментальних даних з ентальпій утворення та плавлення плюмбідів ітербію автори (Sommer et al., 1995) розраховували значення ентальпій змішування рідких сплавів за температур плавлення сполук для складів, що відповідають складам сполук, за рівнянням:

$$\Delta_m H(x, T_m) = \Delta_f H(Yb_{1-x}Pb_x) \cdot (T_m) + \Delta_{fus} H(Yb_{1-x}Pb_x) - x \Delta_{fus} H(Pb) \cdot (T_m) - (1-x) \Delta_{fus} H(Pb) \cdot (T_m), \quad (5)$$

де $\Delta_f H$, $\Delta_{fus} H$ – ентальпії утворення та плавлення сполук і чистих компонентів; T_m – температури плавлення. Результати розрахунків представлено на рис. 1.

Асиметрія концентраційної залежності та значні від'ємні величини ентальпії змішування розплавів вказують на розвинений ближній порядок і наявність асоціатів у рідині. За допомогою моделі (ІАР) автори в (Sommer et al., 1995) розраховували значення енергії Гіббса й ентропії змішування переохолоджених рідких сплавів Yb – Pb за 1 100 К. Мінімальні значення енергій Гіббса й ентропії змішування переохолоджених рідких сплавів Yb – Pb за 1100 К дорівнюють 43 і 21 Дж/моль*К.

Термодинамічне моделювання всіх фаз системи Pb – Yb виконано за допомогою CALPHAD-методу в (Idbenali et al., 2009). Рідка фаза була описана за допомогою

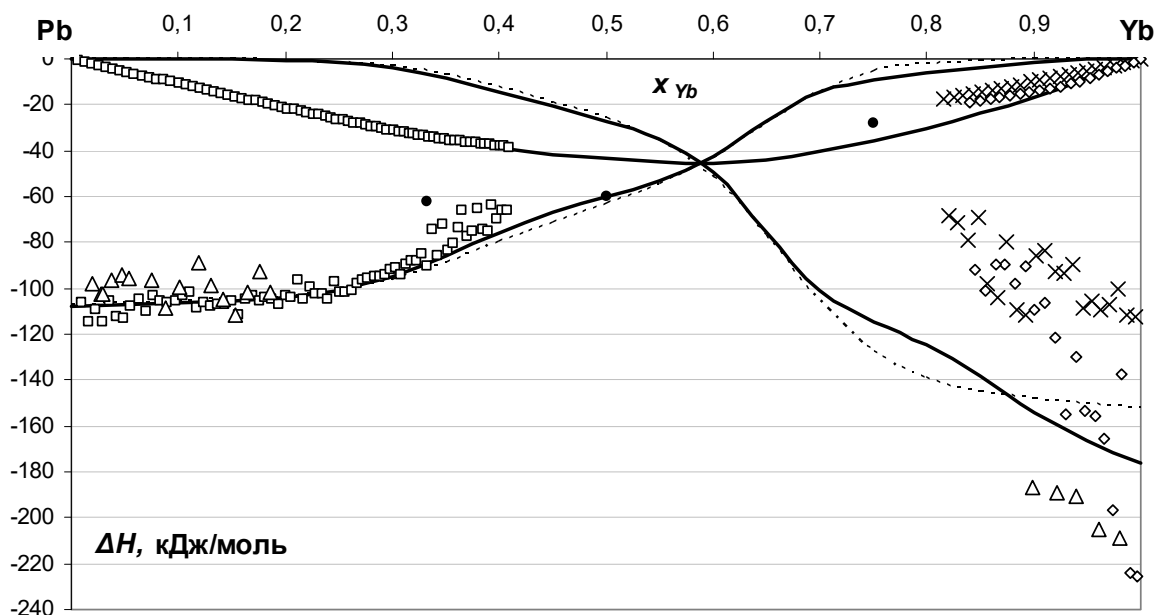


Рис. 1. Інтегральні та парціальні ентальпії змішування розплавів системи Pb – Yb

експериментальні точки
наші:
□ – дослід № 1, 1 070–1 100 К;
x – дослід № 2, 1 140 К;
М – дослід № 3, 1 100–1 120 К;
(Sommer et al., 1995);
Δ – за 1 060–1 100 К.

розрахунок за моделлю IAP:
— – 1 100 К;
..... – 1 200 К;
• розраховані з ентальпій
утворення сполук
(Sommer et al., 1995).

моделі регулярного асоційованого розчину, у якому Yb_2Pb є асоціатом. YbPb_3 , Yb_5Pb_3 і Yb_2Pb були оброблені як стехіометричні сполуки. Розрахунки на основі термодинамічного моделювання показали добре узгодження з даними фазової діаграми й експериментальними термодинамічними значеннями (Sommer et al., 1995). Ентальпії змішування розплавів (ΔH) (Idbenali et al., 2009) близькі до тих, що отримані (Sommer et al., 1995). Але в мінімумі вони незначно менш екзотермічні, що наведені в (Sommer et al., 1995).

Матеріал і методи

Експериментальні дослідження на даному ізопериметричному калориметрі проведені згідно з методикою експерименту, що описана в (Судавцова та ін., 2019). Для виконання експериментів використано такі матеріали: Pb (99,9999%), Yb (99,9%), Mo (99,96%).

Дослідження багатих на плюмбум сплавів виконували в молібденових або корундових, футерованих оксидом ітрію тиглях, які під час дослідів не взаємодіяли з досліджуваними розплавами. Відомо, що для плюмбуму за нормальної температури його плавлення характерний досить високий тиск насиченої пари. Це спричиняє ускладнення

досліджень розплавів із високим вмістом плюмбуму через хімічну агресивність парів і складний контроль змін складу розплавів під час експерименту. Леткістю ітербію ж за температур 1 100–1 300 К можна знехтувати. Підтримка за можливості низьких температур дозволяє уникати значних втрат маси сплавів унаслідок випаровування плюмбуму, а також взаємодії сплавів із матеріалом тиглів.

Виконано дві серії експериментів із боку ітербію й одну – плюмбуму (табл. 1). На початку дослідження маси чистих плюмбуму й ітербію в тиглі становили 2,4 і 1,3–1,8 г відповідно. Маси зразків, що поміщали до тигля, становили 0,015–0,04 г, молібдену – 0,06–0,09 г. На початку дослідження проводили калібрування калориметра зразками Yb або Pb, а всередині та наприкінці дослідів для цієї мети використовували зразки, що було виготовлено з молібдену. Багаторазовими калібруваннями встановлено зміну коефіцієнта теплообміну калориметра (його ефективної теплоємності), що під час усієї серії поступово зростає приблизно удвічі через збільшення маси сплаву в тиглі. Після виконання досліджень втрата маси сплаву через випаровування плюмбуму становила 0,4210 г серії з боку плюмбуму,

а також лише 0,006 г – ітербію. Тобто 15% вихідного пюмбуму випарувалось у першому випадку. Це враховували як поправку до складу розплаву, яка наростала під час серії експериментів. Швидкість випаровування пюмбуму вважалась пропорційною його концентрації в розплаві. Проте наступні розрахунки показали, що активність пюмбуму за додавання ітербію зменшується різкіше, що частково компенсувалось підвищенням температури під час серії експериментів із 1 100 до 1 220 К. Отже, 15% вихідного пюмбуму було випарувано в першому випадку. Це враховували як поправку до складу розплаву, яка наростає під час серії експериментів. Для дослідів щодо Європію поправку концентрації не вводили.

Розрахунок теплових ефектів, які супроводжували процес розчинення зразків у розплавах, виконували з використанням рівняння теплового балансу:

$$K \int_0^{\tau} (T - T_0) dt = \Delta H_T + n_i \Delta H_{298}^T, \quad (6)$$

де ΔH_{298}^T – ентальпія нагріву 1 моль добавки від 298 К до температури експерименту, яка розраховувалась за рівняннями з (Dinsdale, 1991); K – коефіцієнт теплообміну калори-

метра; n_i – кількість добавки, моль; τ_{∞} – час зміни релаксації температури за запису фігури теплообміну завдяки розчиненню зразків у калориметричній ванні; $T - T_0 = \Delta T$ – різниця температур між тиглем із розплавом та ізотермічною оболонкою калориметра; t – час.

Згідно з парціальними ентальпіями змішування ітербію або Рb проводили обчислення аналогічних параметрів для другого компонента внаслідок інтегрування рівняння Гіббса – Дюгема. Розрахунок інтегральних ентальпій змішування розплавів проводили за рекурсивним рівнянням:

$$\Delta H^{n+1} = \Delta H^n + (\Delta \bar{H}_i^{n+1} - \Delta H^n) (x_i^{n+1} - x_i^n) / (1 - x_i^n), \quad (7)$$

що виконується за незначної зміни концентрації компонента i від x_i^n до x_i^{n+1} під час додавання $(n+1)$ -го зразка.

Узгодження експериментальних даних одне з одним проводили за допомогою програми, що використовує основні принципи моделі ідеальних асоційованих розчинів (далі – ІАР). Нами було спеціально створено програму для розрахунків за ІАР, до якої вводились усі наявні експериментальні термодімічні відомості щодо всіх фаз, а також перелік сполук у твердих сплавах (відпо-

Таблиця 1

Експериментальні значення парціальних ентальпій змішування Yb і Рb у розплавах системи Рb – Yb за 1100 К (кДж/моль)

Дослід № 1 за 1 070–1 100 К				Дослід № 2 за 1 140 К		Дослід № 3 за 1 100–1 120 К	
x_{Yb}	$\Delta \bar{H}_{Yb}$	x_{Yb}	$\Delta \bar{H}_{Yb}$	x_{Yb}	$\Delta \bar{H}_{Pb}$	x_{Yb}	$\Delta \bar{H}_{Pb}$
0,0096	-106,6	0,2457	-97,47	0,9958	-112,2	0,9966	-225,4
0,0160	-114,6	0,2513	-102	0,9874	-111,8	0,9895	-223,9
0,0225	-109,5	0,2567	-101,8	0,979	-100	0,9818	-137,3
0,0290	-114,4	0,2621	-100,9	0,9706	-107,1	0,9738	-196,6
0,0355	-105,5	0,2673	-97,73	0,9622	-109,3	0,9657	-165,7
0,0423	-112,1	0,2726	-96,33	0,9538	-105,5	0,957	-155,6
0,0491	-113,5	0,2779	-95,74	0,9454	-108,8	0,948	-153,1
0,0559	-107,6	0,2831	-95,16	0,937	-89,61	0,939	-129,6
0,0628	-105,2	0,2883	-94,87	0,9287	-93,05	0,9299	-154,8
0,0698	-109,9	0,2935	-94,25	0,9202	-92,62	0,9205	-121,3
0,0767	-103,1	0,2986	-92,28	0,9103	-83,22	0,9104	-106,2
0,0836	-105,8	0,3037	-90,83	0,9013	-86,08	0,901	-109,2
0,0904	-106	0,3088	-94,43	0,8924	-111,8	0,8917	-90,27
0,0972	-105,4	0,3136	-89,32	0,8835	-109,3	0,8824	-97,60
0,1039	-103,2	0,3182	-88,21	0,8745	-79,39	0,8732	-89,28
0,1106	-101,4	0,323	-87,89	0,8655	-104,2	0,8641	-89,84
0,1172	-108,4	0,3279	-84,93	0,8565	-97,7	0,8549	-101,3
0,1239	-106,7	0,3328	-90,23	0,8476	-69,13	0,8455	-91,68
0,1306	-107,7	0,3376	-74,09	0,8385	-78,77		

Продовження таблиці 1

0,1371	-106,8	0,34	7,361	0,8294	-71,76		
0,1437	-107,4	0,3399	9,783	0,8203	-68,59		
0,1502	-105,9	0,3399	9,537				
0,1566	-111,9	0,3422	-85,65				
0,1631	-104,6	0,347	-72,35				
0,1694	-103,5	0,3519	-83,53				
0,1756	-105,6	0,3567	-80,35				
0,1818	-104,2	0,3614	-73,33				
0,1879	-105,1	0,3662	-66,13				
0,1940	-107,1	0,3708	-77,13				
0,2000	-103,4	0,3755	-75,11				
0,2059	-104,3	0,3802	-65,11				
0,2117	-96,32	0,3849	-74,76				
0,2175	-104,9	0,3893	-75,4				
0,2232	-99,79	0,3938	-63,86				
0,2289	-102,2	0,3983	-69,78				
0,2346	-102,7	0,4027	-66,23				
0,2402	-105,1	0,4072	-66,33				

відно до діаграми стану), декілька образних асоціатів у розплавах. Для даних сполук у твердих сплавах і асоціатів у рідких задавалися початкові значення ентальпій і ентропій утворення із чистих компонентів. Вони за оптимізації під час роботи програми були змінними параметрами. Якщо набір асоціатів задавали правильно, а отримані експериментально та всі наявні літературні відомості були несуперечливими, то за визначеного значення цих параметрів досягається задовільне узгодження з усіма експериментальними даними.

Результати

Одержані експериментальні значення парціальних ентальпій змішування Yb і Pb у розплавах системи Pb – Yb представлено нижче.

На рис. 1 представлено парціальні й інтегральні ентальпії змішування розплавів системи Pb – Yb, одержані нами за 1 070–1 140 К (Sommer et al., 1995) і за 1 060 і 1 100 К, а також апроксимовані згідно з моделлю IAP та розраховані (Sommer et al., 1995).

Видно, що наші дані в середній області складів не узгоджуються з розрахованими (Sommer et al., 1995), а концентраційні залежності інтегральних ентальпій змішування є асиметричними. Окрім того, дані, розраховані (Sommer et al., 1995), є більш екзотермічними, ніж визначені нами, і виявляють інший хід.

Великий розкид $-\Delta H_{Pb}$ за $0,8 < x < 1$ зумовлений, імовірно, утворенням на поверхні ітербію оксидної плівки, яку важко пробити

зразком із свинцю. Щоб цьому запобігти, калориметричну ванну треба було прогрівати до 700 К, лише після цього робочу камеру калориметра заповнювати гелієм. Зазначимо, що інтегральні та парціальні ентальпії змішування розплавів системи Pb – Yb за 1 100 та 1 200 К практично збігаються. Експериментальні результати за інтегральними та парціальними ентальпіями змішування розплавів системи Pb – Yb за 1 100 К (кДж/моль) апроксимували поліноміальними залежностями виду:

$$\Delta H = -163.47x_{Yb}^4 + 434.61x_{Yb}^3 - 189.43x_{Yb}^2 - 80.529x_{Yb} - 0.6365, \quad (8)$$

$$\Delta \bar{H}_{Yb} = 1566.6x_{Yb}^6 - 3955.2x_{Yb}^5 + 3264.2x_{Yb}^4 - 1158.4x_{Yb}^3 + 431.18x_{Yb}^2 - 41.629x_{Yb} - 106.85, \quad (9)$$

$$\Delta \bar{H}_{Pb} = -5926.7x_{Yb}^6 + 17631x_{Yb}^5 - 18764x_{Yb}^4 + 8526.4x_{Yb}^3 - 1774.3x_{Yb}^2 + 131.81x_{Yb} - 1.1898, \quad (10)$$

з них розраховували значення аналогічних параметрів для даних розплавів за округлених концентрацій, які наведено в табл. 2, з довірчими інтервалами, рівними двом середньоквадратичним похибкам апроксимації відповідних експериментальних даних, тобто за правилом 2 σ .

Виявлено, що мінімальне значення ентальпії змішування досліджених розплавів (ΔH_{\min}) становить $-45,7 \pm 0,8$ (за $x_{Pb} = 0,37$), а $\Delta \bar{H}_{Yb}^{\infty} = -107,5 \pm 8,3$; $\Delta \bar{H}_{Pb}^{\infty} = -176,2 \pm 37,5$ кДж/моль. Зсув мінімуму ΔH розчину, насиченого Yb, корелює з поведінкою сплавів даної та подібних систем у твердому стані.

Таблиця 2

Парціальні й інтегральні ентальпії змішування розплавів системи Pb – Yb за округлених концентрацій (у кДж/моль)

x_{Yb}	$-\Delta H \pm 2\sigma^*$	$-\Delta \bar{H}_{Yb} \pm 2\sigma$	$-\Delta \bar{H}_{Pb} \pm 2\sigma$
0	0	107,5±4,7	0
0,1	10,7±0,5	106,6±2,7	0,06
0,2	21,3±0,3	104,1±2,9	0,5
0,3	31,2±0,4	95,3±5,3	3,8
0,4	39,0±1,3	75,8±11,4	14,5
0,5	43,6	60,0	27,3
0,6	45,4	42,6	49,6
0,7	40,6	14,8	100,8
0,8	30,1±1,7	6,5	124,7±26,8
0,9	16,6±1,0	1,3	153,9±21,5
1	0	0	176,2±25,2

Примітка: σ – середня квадратична похибка апроксимації експериментальних даних.

Зокрема, згідно з діаграмою стану системи Pb – Yb (Masalsky, 1990), Yb і Pb утворюють декілька інтерметалідів, серед них Yb₂Pb – найбільш тугоплавкий (1 518 К) та плавиться конгруентно. Згідно із (Sommer et al., 1995), мінімум ентальпії змішування розплавів даної системи становить -62,0 кДж/моль та припадає на склад $x_{Pb} = 0,3$, який є більш екзотермічним, ніж виявлений нами.

Обговорення

Для отримання детальної інформації щодо термодинамічних властивостей розплавів та інтерметалідів досліджуваної системи було виконано розрахунки та їх оптимізацію за моделлю IAP. Із цієї метою було використано дані діаграми стану (Masalsky, 1990), власні термохімічні властивості розплавів і літературні відомості для проміжних фаз (Sommer et al., 1995; Palenzona & Cirafici, 1973), системи Yb – Pb. Чотири сполуки були обрані як асоціати: Yb₅Pb, Yb₂Pb, YbPb, YbPb₂.

Апроксимацію оптимізованих за моделлю IAP інтегральних і парціальних ентропій (Дж/моль/К) змішування розплавів системи Pb – Yb за 1 200 К виконували за такими поліноміальними залежностями:

$$\Delta S = x_{Yb}x_{Pb}(-87.6 - 70.2x_{Pb} - 368x_{Pb}^2 + 2278x_{Pb}^3 - 2965x_{Pb}^4 + 1182x_{Pb}^5), \quad (11)$$

$$\Delta S_{Eu} = x_{Pb}^2(-17.34 + 595.4x_{Pb} - 7938x_{Pb}^2 + 20971x_{Pb}^3 - 20734x_{Pb}^4 + 7093x_{Pb}^5), \quad (12)$$

$$\Delta S_{Pb} = x_{Eu}^2(-87.55 - 140.4x_{Pb} - 1104x_{Pb}^2 + 9113x_{Pb}^3 - 14823x_{Pb}^4 + 7093x_{Pb}^5). \quad (13)$$

На рис. 2 представлено розраховані за IAP активності компонентів і мольні частки асоціатів у розплавах.

Очікувано, що в досліджуваних розплавах утворюється велика кількість асоціатів, особливо YbPb. Максимальна мольна частка асоціату YbPb досягає значення 0,75, а Yb₂Pb, YbPb₂ – 0,59 і 0,28 відповідно. У цих розплавах переважають асоціати YbPb. Активності компонентів у розплавах системи Pb – Yb демонструють суттєві від'ємні відхилення від ідеальних розчинів, тому ми спостерігаємо кореляцію з установленими нами термохімічними властивостями. Це є підтвердженням сильної міжкомпонентної взаємодії в розплавах системи Pb – Yb, адже під час їх утворення може відбуватися перехід зовнішніх електронів Yb на бр-орбітали Pb.

Розраховані згідно з активностями компонентів енергії Гіббса змішування, а також оптимізовані за IAP інтегральні мольні ентальпії розплавів системи Pb – Yb за 1 200 К зібрано на рис. 3. Виявлено, що значення ΔG у всьому діапазоні концентрацій є більшими, ніж ΔH ($\Delta G_{\min} = -31,8$ кДж/моль за $x_{Pb} = 0,45$). Остання функція – менш асиметрична, що зумовлено ентропійним внеском (ентропія змішування досліджених розплавів від'ємна, а $\Delta S_{\min} = -18,5$ Дж/моль*К за $x_{Pb} = 0,4$).

Розраховані нами за IAP та з використанням методу CALPHAD (Idbenali et al., 2009) разом з аналогічними даними (Sommer et al., 1995) значення стандартних ентальпій і ентропій утворення асоціатів у розплавах

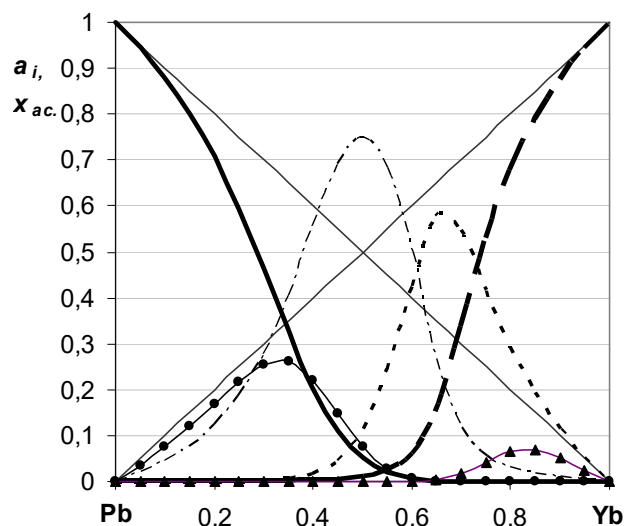


Рис. 2. Активності компонентів (— — — — a_{Pb} ; — — — — a_{Yb}) і мольні частки асоціатів (..... — x_{Yb2Pb} ; □□□ — x_{YbPb} ; —●— — x_{YbPb2} ; ▲ — — — x_{Yb5Pb}) у розплавах системи Pb – Yb за 1 100 К

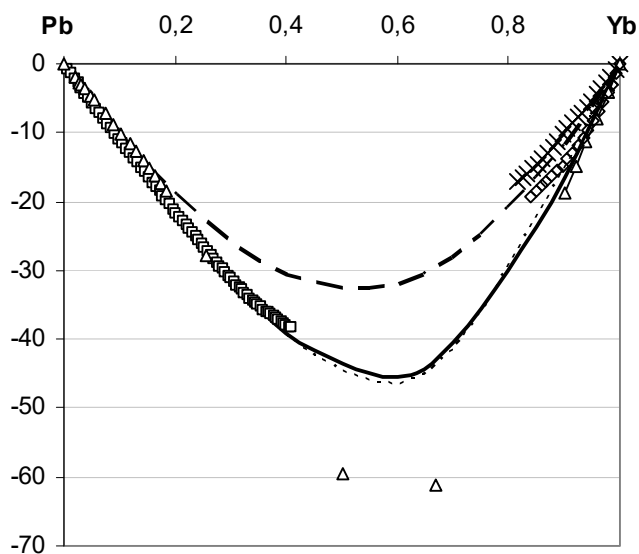


Рис. 3. Інтегральні ентальпії (— за 1100 К, □□ за 1200 К) і енергії Гіббса (--- за 1100 К) змішування розплавів системи Pb – Yb, оптимізовані та розраховані нами за МІАР, а також дані (Sommer et al., 1995) (—Δ—)

і сполук із чистих компонентів системи Pb – Yb представлено на рис. 4 а, б і в табл. 3. Згідно з отриманими результатами, найбільшим виділенням теплоти супроводжується утворення фази Yb_2Pb . Відзначаємо кореляцію, адже фаза Yb_2Pb – найбільш тугоплавка та плавиться конгруентно. Але більш екзотермічними, ніж встановлено нами, є дані

(Sommer et al., 1995). Тому потрібне додаткове експериментальне підтвердження цих даних.

Видно, що стандартні ентальпії (а) і ентропії (б) утворення асоціатів у розплавах (—◇—) та інтерметалідів (—■—) системи Yb – Pb, розраховані за моделлю ІАР, не дуже різняться одне від одного. Розраховані нами з МІАР ентальпії утворення сполук Yb_mPb_n у межах експериментальної похибки узгоджуються з літературними даними (Sommer et al., 1995; Borzone et al., 1993). Ентальпії утворення інтерметалідів Yb_mPb_n , обчислені нами за МІАР, близькі одна з одною. Змодельовані ж методами CALPHAD (Idbenali et al., 2009) є більшими для фази $YbPb_3$ невеликими додатними. Це малоймовірно. Тому перевагу треба віддати нашим ентропіям утворення сполук, розрахованим у даній роботі.

Температурні залежності перших парціальних мольних ентальпій Yb та Pb у розплавах системи Yb – Pb, які розраховано за моделлю ІАР, представлено на рис. 5.

За допомогою моделі ІАР також проведено розрахунок температурно-концентраційних залежностей енергій Гіббса, ентальпій і ентропій утворення розплавів і температурні залежності для інтерметалідів, а з них – координати кривої ліквідусу діаграми стану дослідженої системи. Крива ліквідусу системи Yb – Pb, розрахована нами в результаті оптимізації з використанням описаної вище термодинамічної моделі, разом з экс-

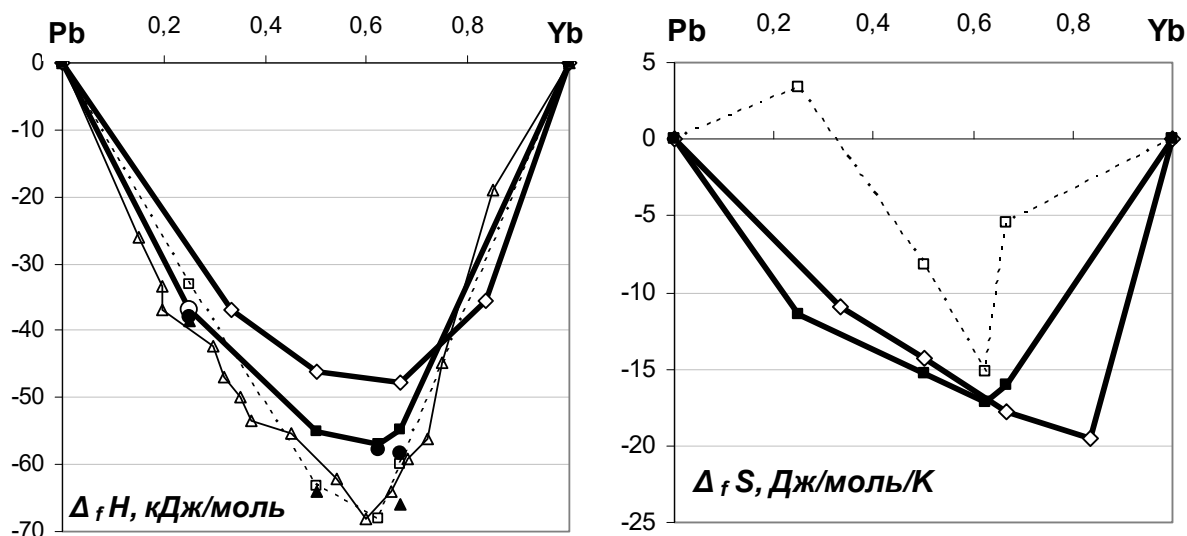


Рис. 4. Стандартні ентальпії (а) і ентропії (б) утворення асоціатів у розплавах (—◇—) та інтерметалідів (—■—) системи Yb – Pb, розраховані за моделлю ІАР; літературні дані: ○ – (Palenzona & Cirafici, 1973), □□ – (Idbenali et al., 2009), —Δ, ▲ – (Sommer et al., 1995), ● – (Schiffman, 1982)

Таблиця 3

Стандартні ентальпії й ентропії утворення інтерметалідів системи Pb – Yb, розраховані нами і (Schiffman, 1982)

x_{Yb}	Фаза	$\Delta_f H$, кДж/моль	$\Delta_f S$, Дж/моль/К	Література
0,25	Pb ₃ Yb	-36,9	-11,5	Наші
		-38,5		(Sommer et al., 1995)
		-38,1		(Schiffman, 1982)
		-37,0		(Palenzona & Cirafici, 1973)
0,5	PbYb	-55,1	-15,2	Наші
		-57/3±0,8		(Schiffman, 1982)
		-63,1	-8,2	(Idbenali. et al., 2009)
		-64±2.5*/65.0±2.0**		(Sommer. et al., 1995)
0,625	Pb ₃ Yb ₅	-57,0	-17,1	Наші
		-68,1	-15,2	(Idbenali. et al., 2009)
		-57,7		(Schiffman, 1982)
0,667	PbYb ₂	-54,7	-16,0	Наші
		-64,0	-5,5	(Idbenali. et al., 2009)
		-66,0 ± 5,0*/-67,0 ± 3,0**		(Sommer. et al., 1995)
		-58,2 ± 2,3		(Schiffman, 1982)

Примітки: * – калориметрія розчинення; ** – калориметрія прямого синтезу.

периментальними даними (Masalsky, 1990) наведена на рис. 6. Зрозуміло, що розраховані й експериментальні дані добре узгоджуються одне з одним. Нонваріантні реакції в системі Yb – Pb наведено в табл. 4.

Зрозуміло, що розраховані нами і (Idbenali et al., 2009) добре узгоджуються одне з одним. Нонваріантні реакції в системі Yb – Pb наведено в табл. 4.

Згідно із проведеними дослідженнями встановлено повну інформацію щодо термодинамічних властивостей розплавів і про-

міжних фаз, а також положення кривої ліквідусу на діаграмі стану системи Pb – Yb. Одержані результати можна успішно використовувати для виведення закономірностей у термодинамічних властивостях різних фаз систем Pb – Ln, а також для прогнозування цих параметрів недосліджених потрійних систем Pb – Ln – M за різними моделями.

Висновки

З установлених за 1 100–1 200 К термодинамічних властивостей розплавів системи Pb – Yb з'ясували, що вони утворюються з виділенням великої кількості теплоти ($\Delta H_{\infty}^{\text{in}}$ дорівнює $-45,7 \pm 0,8$ за $x_{Pb} = 0,37$, а $\Delta H_{Yb} = -107,5 \pm 4,7$; $\Delta H_{Pb} = -176,2 \pm 25,3$ кДж/моль.), що корелює з поведінкою цих сплавів у твердому стані.

На основі власних і літературних термодинамічних властивостей розплавів і проміжних фаз системи Yb – Pb розраховані всі їхні термодинамічні властивості в широкому інтервалі температур за моделлю ІАР. Показано, що розплави системи Yb – Pb проявляють великі від'ємні відхилення від ідеальних розчинів, а $\Delta G_{\text{min}} = -31,8$ кДж/моль за $x_{Pb} = 0,45$, $\Delta S_{\text{min}} = -18,5$ Дж/моль*К за $x_{Pb} = 0,45$. Одержані дані узгоджуються з більшістю літературних даних, коректно описують природу й енергію взаємодії між компонентами досліджуваних розплавів.

Крива ліквідусу системи Yb – Pb, розрахована й оптимізована з використан-

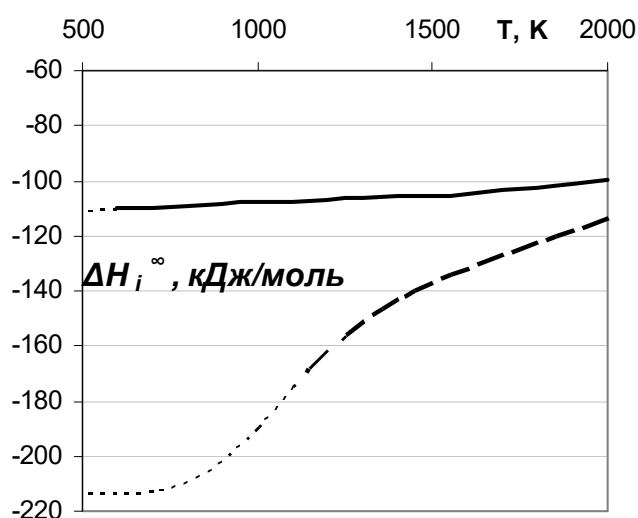


Рис. 5. Температурні залежності перших парціальних мольних ентальпій Yb (—) і Pb(---) у розплавах системи Yb – Pb, розраховані за моделлю ІАР

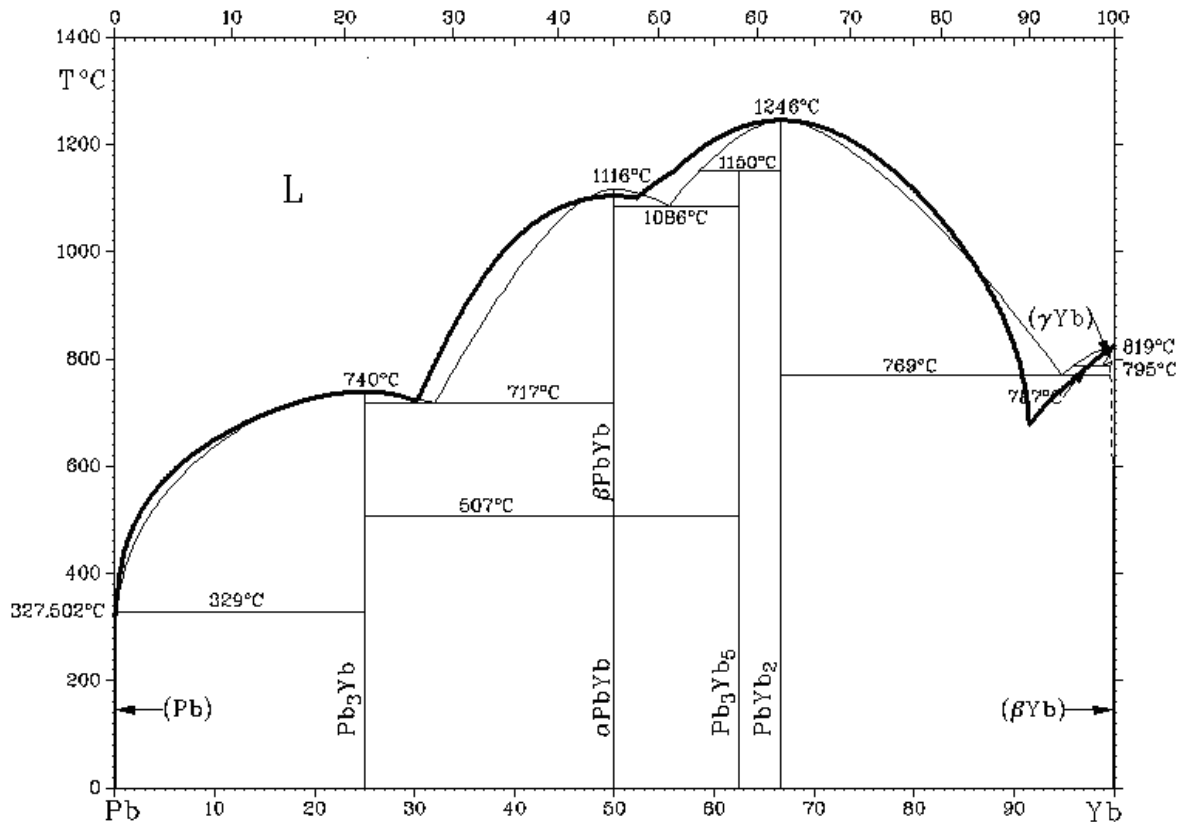


Рис. 6. Діаграма стану системи Yb – Pb. Жирні та тонкі лінії – розраховані нами і (Idbenali et al., 2009) відповідно

Таблиця 4

Нонваріантні реакції в системі Pb – Yb L

Реакції	Тип	T, K	T, °C	$x_{Pb}(\text{liquid}^*)$	$x_{Pb}(\text{solid}^{**1})$	$x_{Pb}(\text{solid}2)$
$L = Yb + Yb_2Pb$	Евтектика	951	678	0,085	0,000	0,333
$L = Yb_2Pb$	Конгруентний	1 519	1 246	0,333	0,333	–
$L + Yb_2Pb = Yb_5Pb_3$	Перитектичний	1 423	1 150	0,440	0,333	0,375
$L = Yb_5Pb_3 + YbPb$	Евтектика	1 374	1 101	0,478	0,375	0,500
$L = YbPb$	Конгруентний	1 378	1 105	0,500	0,500	–
$L = YbPb + YbPb_3$	Евтектика	995	722	0,698	0,500	0,750
$L + YbPb_3$	Конгруентний	1 013	740	0,750	0,750	–
$L = YbPb_3 + Pb$	Евтектика	597	324	0,999	0,750	1,000

Примітки: * liquid – рідка фаза; ** solid – тверда фаза.

ням розробленої термодинамічної моделі, ко-хімічного аналізу й оцінено методом узгоджується з одержаною методами фізи- CALPHAD.

Список використаної літератури

- Буланова М.В., Буянов Ю.І., Сидорко В.Р. Взаємодія рідкісноземельних металів зі свинцем. Препрінт №1 ІПМ ім. І.М. Франзович. Київ, 2001, 107 с.
- Савіцький Є.М. Єфімов Ю.В. Сумароков В.М. Надпровідні плівкові матеріали змінного складу, отримані випаром та конденсацією у вакуумі. Металофізика. 1977. № 68. С. 47–54.
- Судавцова В.С., Шевченко М.О., Іванов М.І., Кудін В.Г., Подопрігора Н.В. Термодинамічні властивості та фазові рівноваги в сплавах системи Nd–Ni. Порошкова металургія. 2019. № 9/10. С. 107–118.

Borzone G., Parodi N., Ferro R., Gambino M., Bros J.P. Remarks on the Role of Thermochemical Data in Intermetallic Crystallochemistry. *Alloys Compounds*. 1993. V. 201. P. 17.

Dinsdale A.T. SGTE data for pure elements. *Calphad*. 1991. V. 15(4). P. 319-427. [https://doi.org/10.1016/0364-5916\(91\)90030-N](https://doi.org/10.1016/0364-5916(91)90030-N).

Idbenali M., Servant C., Selhaoui N., Bouirdena L. Thermodynamic description of the Pb-Yb binary system. *Calphad*. 2009. V. 33. P. 570-575. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2009.05.001>.

Gambino R.J., Stemple N.R., Toxen A.M. Superconductivity of lanthanum intermetallic compounds with the Cu₃Au structure. *J. Phys. Chem.Solids*. 1968. V. 29. №2. P.295-302. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(68\)90074-7](https://doi.org/10.1016/0022-3697(68)90074-7).

Masalsky T.B. (ed) / Binary Alloy Phase Diagrams 2nd edn (Metals Park, OH: ASM International). 1990.

Palenzona A., Cirafici S. Dynamic differential calorimetry of intermetallic compounds. II Heats of formation, heats and entropies of fusion of rare earth-lead (RePb₃) compounds. *Thermochim. Acta*. 1973. V. 6(5). P. 455-460.

Schiffman R.A. Thermodynamics of the Ytterbium-Lead System by Simultaneous Weight-Loss-Mass-Spectrometry Knudsen Effusion. *J. Phys. Chem.* 1982. V. 86 P. 3855. <https://doi.org/10.1021/j100216a030>.

Sommer F., Predel B., Borzone G., Parodi N., Ferro R. Calorimetric determination of the enthalpies of formation of liquid and solid Yb-Pb alloys. *Intermetallics*. 1995. V. 3. P. 15-22. [https://doi.org/10.1016/0966-9795\(94\)P3682-E](https://doi.org/10.1016/0966-9795(94)P3682-E).

References (translated & transliterated)

Bulanova, M.V., Buianov, Yu.I., & Sydorko, V.R. (2001). Vzaiemodiia ridkiszozemelnykh metaliv zi svyntsem [Interaction of rare earth metals with lead]. Preprint №1 IPM im. I.M. Frantsovykh. Kyiv [in Ukrainian].

Cavitskyi, Ye.M., Yefimov, Yu.V., & Sumarokov, V.M. (1977). Nadprovidni plivkovi materialy zminnoho skladu, otrymani vyparom ta kondensatsiieiu u vakuumi. [Above-conductor spittle materials are stored in a warehouse, separated by steam and condensation in a vacuum]. *Metalofizyka [Metaphysics]*, 68, 47-54 [in Ukrainian].

Sudavtsova, V.S., Shevchenko, M.O., Ivanov M.I., Kudin, V.H., & Podopryhora, N.V. (2019). Termodynamichni vlastyvoli ta fazovi rivnovahy v splavakh systemy Nd-Ni [Thermodynamic properties and phase equilibria in alloys of the Nd-Ni system]. *Poroshkova metalurhiya [Powder metallurgy]*, 9/10, 107-118 [in Ukrainian].

Borzone, G., Parodi, N., Ferro, R., Gambino, M., & Bros, J.P. (1993). Remarks on the Role of Thermochemical Data in Intermetallic Crystallochemistry. *Alloys Compounds*, 201, 17 [in English].

Dinsdale, A.T. (1993). SGTE data for pure elements. *Calphad*, 15(4), 319-427. [https://doi.org/10.1016/0364-5916\(91\)90030-N](https://doi.org/10.1016/0364-5916(91)90030-N) [in English].

Idbenali, M., Servant, C., Selhaoui, N., & Bouirdena, L. (2009). Thermodynamic description of the Pb-Yb binary system. *Calphad*, 33, 570-575. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2009.05.001> [in English].

Gambino, R.J., Stemple, N.R., & Toxen, A.M. (1968). Superconductivity of lanthanum intermetallic compounds with the Cu₃Au structure. *J. Phys. Chem.Solids*, 29(2), 295-302. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(68\)90074-7](https://doi.org/10.1016/0022-3697(68)90074-7) [in English].

Masalsky, T.B. (ed.) (1990). Binary Alloy Phase Diagrams 2nd edn (Metals Park, OH: ASM International) [in English].

Palenzona, A., & Cirafici, S. (1973). Dynamic differential calorimetry of intermetallic compounds. II Heats of formation, heats and entropies of fusion of rare earth-lead (RePb₃) compounds. *Thermochim. Acta*, 6(5), 455-460 [in English].

Schiffman, R.A. (1982). Thermodynamics of the Ytterbium-Lead System by Simultaneous Weight-Loss-Mass-Spectrometry Knudsen Effusion. *J. Phys. Chem*, 86, 3855. <https://doi.org/10.1021/j100216a030> [in English].

Sommer, F., Predel, B., Borzone, G., Parodi, N., & Ferro, R. (1995). Calorimetric determination of the enthalpies of formation of liquid and solid Yb-Pb alloys. *Intermetallics*, 3, 15-22. [https://doi.org/10.1016/0966-9795\(94\)P3682-E](https://doi.org/10.1016/0966-9795(94)P3682-E) [in English].

Отримано: 14.09.2023

Прийнято: 10.10.2023



АГРОНОМІЯ

УДК 631.1: 58.056:519

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.11>

ОЦІНКА МІНЛИВОСТІ ВРОЖАЇВ ОСНОВНИХ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР І ОПТИМІЗАЦІЯ ЇХ ПОСІВНИХ ПЛОЩ НА ТЕРИТОРІЇ МИКОЛАЇВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

А. О. Ільїна¹, В. Г. Ільїна², О. І. Чернякова³, А. М. Мозговий⁴

Суттєві зміни кліматичних умов, що спостерігаються за останні 50 років, істотно впливають на результативність вирощування зернових культур. Продуктивність сільського господарства та врожайність орних земель безпосередньо впливають на рівень продовольчої безпеки країн, що розвиваються, та на їхній економічний розвиток. Україна не є винятком. Сучасний стан сільського господарства України характеризується пошуком способів підвищення ефективності виробництва сільськогосподарської продукції шляхом оптимізації посівних площ як ключовим чинником ефективності. Оцінка часової мінливості врожаїв основних зернових культур проводилась на території Миколаївської області, яка характеризується дуже посушливими кліматичними умовами через невелику кількість опадів за значного надходження теплових ресурсів. Тому отримання високих і стійких урожаїв на цій території для більшості зернових культур можливе лише за умови оптимізації посівних площ з урахуванням змін погодних умов. У роботі проведено оцінку часової мінливості врожаїв основних сільськогосподарських культур (озима пшениця, озимий ріпак, ярий ячмінь, овес, кукурудза, соняшник) Миколаївської області за період із 2001 по 2021 роки. Розрахований погодний коефіцієнт варіації врожайності зернових культур, який дозво-

¹ доктор філософії з наук про Землю,
асистент кафедри екології та охорони довкілля
(Одеський державний екологічний університет, м. Одеса)
e-mail: ilina_ann@ukr.net
ORCID: 0000-0003-4108-3239

² кандидат географічних наук,
доцент кафедри екології та охорони довкілля
(Одеський державний екологічний університет, м. Одеса)
e-mail: vilina653@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5781-701X

³ старший викладач кафедри екології та охорони довкілля
(Одеський державний екологічний університет, м. Одеса)
e-mail: oksvital65@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5221-6001

⁴ доцент кафедри екології та природоохоронних технологій
(Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв)
e-mail: a.m.mozgovyy@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9315-169X

лив визначити якісні характеристики зон мінливості врожайності зернових культур і виділити такі градації для досліджуваних культур: озимий ріпак, ярий ячмінь і кукурудза – найстійкіші врожаї, озима пшениця та соняшник – помірно стійкі врожаї, овес – нестійкі врожаї. Було виявлено, що культури, які відносять до найстійкіших врожаїв, охоплюють незначні посівні площі на території області. Найбільші площі перебувають під посівами озимої пшениці та соняшника. Надані рекомендації щодо збільшення площ кукурудзи та ярого ячменю та помірного збільшення площі під озимим ріпаком, який, на жаль, значною мірою виснажує ґрунти. Рекомендовано зменшити площі озимої пшениці та соняшника на 15–20%.

Ключові слова: продуктивність, варіація врожайності, тренд, погодні умови, погодний коефіцієнт, співвідношення посівних площ.

ASSESSMENT OF YIELD VARIABILITY OF MAIN CEREAL CROPS AND OPTIMIZATION OF THEIR SOWING AREAS IN THE TERRITORY OF MYKOLAIV REGION

A. O. Ilna, V. G. Ilna, O. I. Chernyakova, A. M. Mozgovyy

Significant changes in climatic conditions observed over the past 50 years have a significant impact on the effectiveness of growing grain crops. Agricultural productivity and arable land productivity directly affect the level of food security in developing countries and their economic development. Ukraine is no exception. The current state of agriculture in Ukraine is characterized by the search for ways to increase the efficiency of agricultural production by optimizing the sown areas as a key factor of efficiency. The assessment of the temporal variability of yields of the main grain crops was carried out on the territory of the Mykolaiv region, which is characterized by very arid climatic conditions due to a small amount of precipitation with a significant influx of thermal resources. Therefore, obtaining high and stable harvests in this territory for most grain crops is possible only if the sown areas are optimized taking into account changes in weather conditions. The work evaluated the temporal variability of yields of the main agricultural crops (winter wheat, winter rapeseed, spring barley, oats, corn, sunflower) of the Mykolaiv region for the period from 2001 to 2021. The weather coefficient of variation in the yield of grain crops was also calculated, which made it possible to determine the qualitative characteristics zones of grain crop yield variability and distinguish the following gradations for the studied crops: winter rapeseed, spring barley and corn - the most stable crops, winter wheat and sunflower – moderately stable crops, oats - unstable crops. It was found that crops that belong to the most stable crops do not occupy large cultivated areas on the territory of the region. The largest areas are occupied by winter wheat and sunflower crops. The work provides recommendations for increasing the area of corn and spring barley and moderately increasing the area under winter rape, which, unfortunately, depletes the soil to a large extent. It is recommended to reduce the areas of winter wheat and sunflower by 15–20%.

Key words: productivity, yield variation, trend, weather conditions, weather coefficient, ratio of sown areas.

Вступ

Натепер більшість країн, що розвиваються, досить сильно залежать від продуктивності сільського господарства та, як наслідок даного процесу, від урожайності орних земель. У свою чергу, суттєві зміни кліматичних умов, що спостерігаються за останні 50 років, істотно впливають на результативність вирощування зернових культур. Це значною мірою позначається на загальному рівні продовольчої безпеки країни та безпосередньо впливає на її економічний розвиток.

З початку промислового виробництва оптимізація визначалась як ключовий чинник ефективності. Нині існує велика кіль-

кість різноманітних програм, які розроблені для оптимізації процесів і витрат у галузях виробництва, і сільське господарство не є винятком. Оптимізація в сільському господарстві має вирішальне значення не лише для зниження витрат від різноманітних ризиків, але й для підвищення врожайності. Варто відзначити, що сучасний стан сільського господарства України характеризується подальшим пошуком шляхів підвищення ефективності виробництва сільськогосподарської продукції.

Підхід сумісної оцінки біологічної, екологічної й антропогенної складових частин потенціалу врожайності з урахуванням особливостей відповідної місцевості

у своїх роботах описував В.П. Дмитренко (Дмитренко, 2010). Е. Гумбель визначив метод оцінки господарського максимуму врожайності, а також вплив тренду на рівень урожайності. Вагомий внесок у розроблення теоретичних і прикладних проблем дослідження зробили такі науковці: І.Р. Бузько, В.В. Віталінський, Я.І. Єлейко, С.М. Іляшенко, А.Б. Камінський та інші.

Метою представленої роботи є оптимізація посівних площ зернових культур на території Миколаївської області за змін погодних умов.

Матеріал і методи

Для проведення оцінки часової мінливості врожаїв основних зернових культур Миколаївської області використовувались дані щодо врожайності культур із 2002 по 2021 рр. (Екологічний ..., 2022; Регіональна ..., 2022).

Відомо, що існує дві групи чинників, які впливають на мінливість урожаїв сільськогосподарських культур в окремі роки. Перша група охоплює досягнення генетики та селекції, а також технологію обробітку культур (енергозабезпечення сільського господарства, меліорація земель, забезпеченість добривами тощо). Друга група об'єднує метеорологічні чинники, що визначають відхилення врожайності від середнього рівня (Крочак, 2017).

Для проведення роздільної оцінки ступеня впливу на врожайність як рівня культури землеробства, так і умов погоди, часові ряди врожайності сільськогосподарських культур були розкладені на дві частини – стаціонарну та випадкову (Польовий і Божко, 2007). У такій постановці ряд урожайності можна представити у вигляді загальної статистичної моделі такого виду:

$$Y_t = f(t) + U_t \quad (1)$$

де $f(t)$ – стаціонарна послідовність; U_t – випадкова послідовність.

Стаціонарна складова частина називається трендом і досить точно характеризує середній рівень урожайності, зумовлений рівнем культури землеробства, економічними та природними особливостями конкретного району. Випадковий складник зумовлюється погодними особливостями окремих років, визначає їхній вплив на формування врожайності та представляє відхилення від лінії тренду (Білоусько, 2013).

У роботі досліджувалися ряди врожайності озимої пшениці, озимого ріпаку, ярого ячменю, вівса, соняшника та кукурудзи.

Тенденція врожайності визначалася за допомогою методу гармонійних зважувань. Для проведення аналізу динаміки тенденції врожайності нами розглядався абсолютний приріст тенденції врожайності ΔY_t :

$$\Delta Y_T = Y_{T_i} - Y_{T_i - k} \quad (2)$$

температура тенденції врожайності T_p :

$$T_p = \frac{Y_{T_i}}{Y_{T_i - k}} \cdot 100\% \quad (3)$$

де Y_{T_i} – значення врожайності в i -й рік; $Y_{T_i - k}$ – базисний рівень урожаїв, віддалений від Y_{T_i} на k років, т/га.

Як відомо, через вплив погодних умов урожайність сільськогосподарських культур змінюється щороку. У роботі (Польовий та ін., 2011) використовується погодний коефіцієнт варіації врожайності C_p , який розраховується за формулою:

$$C_p = \frac{1}{\bar{Y}} \sqrt{\frac{\sum(Y_i - \bar{Y})^2 - \sum(\bar{Y}_i - \bar{Y})}{n-1}} \quad (4)$$

де C_p – кліматичний складник мінливості урожаїв; \bar{Y} – середня багаторічна врожайність; Y_i – урожайність конкретного року; \bar{Y}_i – урожайність за трендом у конкретному році; n – тривалість часового ряду врожайності (Бондаренко та ін., 2009).

Результати

На території Миколаївської області вирощуються багато зернових культур (озима пшениця, ярий ячмінь, овес, жито, просо) і технічних (соя, ріпак, соняшник). Спеціалізація рослинницької галузі в області ґрунтується переважно на посівах найбільш рентабельних культур, серед яких пріоритетна роль належить пшениці озимій і соняшнику (рис. 1). Як видно, найбільші посівні площі на території регіону зайняті під соняшником – 22%. Друге місце належить озимій пшениці та ярій пшениці (21%). На третьому місці ячмінь (13%), на четвертому – ярий ячмінь (10%), на п'ятому – кукурудза (5%).

Було проаналізовано динаміку врожаїв і лінії тренду озимої пшениці, ярого ячменю, вівса, соняшнику, ріпаку та кукурудзи. Як приклад у роботі представлено тенденцію динаміки врожайності озимої пшениці в Миколаївській області (рис. 2), а на рис. 3 – відхилення врожаїв озимої пшениці від лінії тренду.

Так, за розрахунковий період середня врожайність озимої пшениці становила 30 ц/га. Мінімальний урожай був зібраний у 2003 р. і дорівнював 14,1 ц/га, максимальний – у 2003 р. (5,6 ц/га). Розрахований

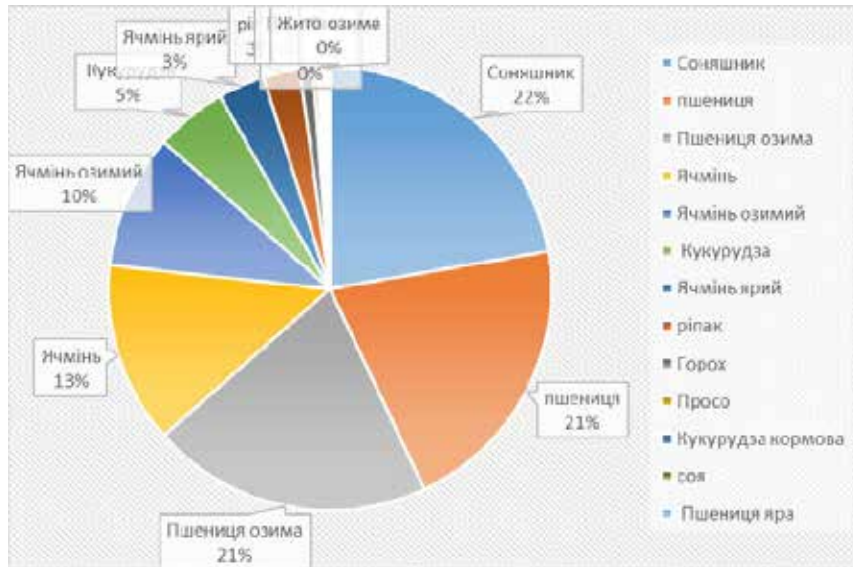


Рис. 1. Посівні площі сільськогосподарських культур Миколаївської області (2017–2021 рр.)



Рис. 2. Динаміка врожайності озимої пшениці в Миколаївській області за період 2002–2021 рр.

за методом гармонійних зважувань урожай за період має тенденцію до підвищення.

Так, на початку розрахункового періоду врожай за трендом становив 20,8 ц/га, а на кінець періоду (2021 р.) – 37,2 ц/га. У 2003 р. спостерігалось найбільше від'ємне відхилення – -16 ц/га, а у 2004 р. найбільше позитивне – 11,1 ц/га (рис. 3).

Нами була проведена оцінка варіації врожайності озимої пшениці, ярого ячменю, озимого ріпаку, вівса, кукурудзи та соняшнику з урахуванням впливу клімату, за В.М. Пасовим. Було виявлено, що найбільший коефіцієнт варіації врожайності зер-

нових культур спостерігається у вівса та дорівнює 0,33. Тому овес можна віднести до категорії нестійких урожаїв. Друге місце за значенням погодного коефіцієнта варіації посідають озима пшениця та соняшник – коефіцієнт варіації дорівнює 0,29, що дає можливість віднести їх до помірно стійких урожаїв. Кукурудзу й озимий ріпак можна віднести до найстійкіших урожаїв, оскільки за класифікацією В.М. Пасова вони мають значення коефіцієнта менше 0,20, дорівнює 0,09 і 0,06 відповідно. Ярий ячмінь має найменше значення погодного коефіцієнта варіації врожайності – 0,02, тому на тери-



Рис. 3. Відхилення від тренду врожайності озимої пшениці в Миколаївській області за період 2002–2021 рр.

торії Миколаївської області ця культура має найстійкіші врожаї.

У результаті проведеного аналізу основних сільськогосподарських культур Миколаївської області стосовно погодного коефіцієнта варіації врожайності та їх посівних площ було виявлено, що посівна площа під соняшником, який за погодним коефіцієнтом варіації врожайності належить до помірно стійкої культури, становить 496,5 тис. га. Це значення є максимальним серед культур, що розглядались (рис. 4). Головною причиною розширення

площі посіву цієї культури став рівень рентабельності виробництва насіння соняшнику – 45,2%, у порівнянні з рентабельністю зернових – 25,3%. Урожайність соняшнику у 2021 р. становила 22,4 ц/га. Для порівняння можна взяти врожай ярого ячменю, який становив 40,3 ц/га, згідно з нашими дослідженнями, ця культура є найстійкішою в Миколаївській області. Площа під посівами соняшнику за останні 20 років збільшилась майже вдвічі, що не є позитивним з погляду агротехнології – він значно виснажує ґрунт. Якщо нехтувати агротехнічними вимогами,

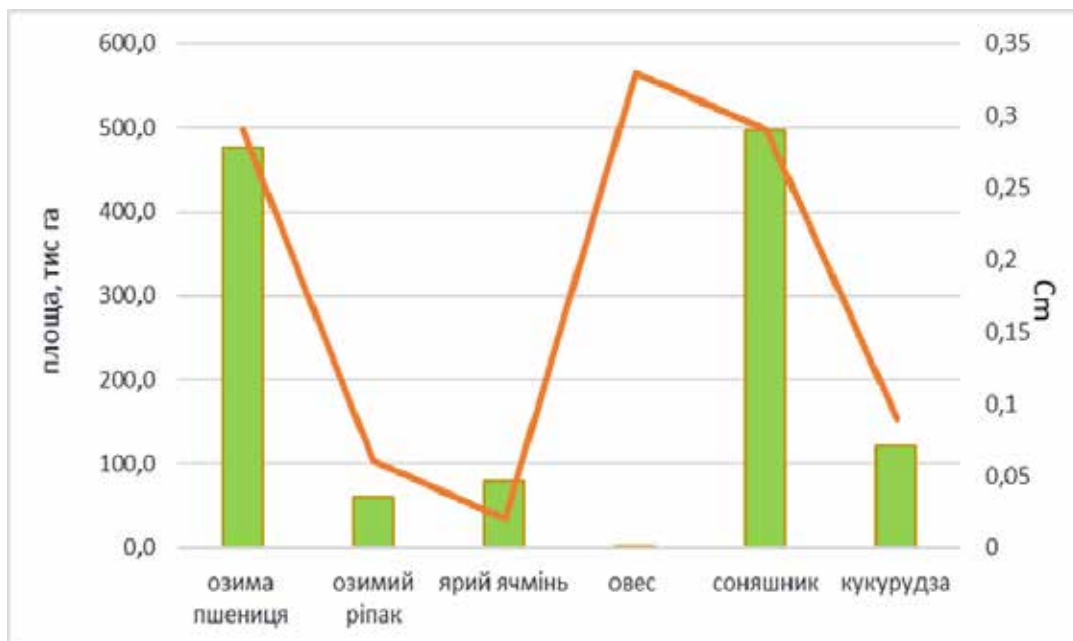


Рис. 4. Стіввідношення посівних площ основних сільськогосподарських культур до значення погодного коефіцієнта варіації врожайності зернових культур на території Миколаївської області у 2021 р.

то це може призвести до суттєвого зменшення врожайності культури та погіршення стану ґрунту (Костюкевич і Колосовська, 2022). Дослідження щодо оцінки допустимих площ вирощування соняшнику за сівозмін показали, що перевищені допустимі норми вирощування соняшнику в 1,5–2,5 раза.

На другому місті за площею під вирощування сільськогосподарських культур опинилась озима пшениця (значення коефіцієнта – 0,29). Посівна площа цієї культури – 476,4 тис. га. Третє місце за кукурудзою з посівною площею 121,4 тис. га та значенням коефіцієнта 0,09, що належить до найстійкіших урожаїв території.

Ярий ячмінь, що був визначений нами як найстійкіша культура Миколаївської області з найнижчим погодним коефіцієнтом варіації врожайності (0,02), під посівами охоплює лише 79,4 тис. га. Це саме стосується й озимого ріпаку, погодний коефіцієнт варіації врожайності якого має значення 0,06 (найстійкіші врожаї), але посівна площа під його посівами – лише 60,06 тис. га.

Останнє місце як за площами посіву, так і за значенням погодного коефіцієнта варіації врожайності (0,33) належить вівсу. Площі посіву цієї культури на території Миколаївської області дорівнюють 1,1 тис. га, а сама культура відноситься до нестійких урожаїв.

Обговорення

Оптимізація та раціональне використання земельних ресурсів, особливо земель сільськогосподарського призначення, має вирішальне значення в умовах змін клімату й інтенсивного землеробства. Саме землі сільськогосподарського призначення є основою для досягнення продовольчої безпеки країни та стійкого розвитку агропромислового комплексу не тільки країни загалом, але й окремих її регіонів (Budziak, 2009). Натепер є велика кількість досліджень, програм і рекомендацій, які розроблені з метою зниження витрат від різноманітних ризиків вирощування сільськогосподарських культур, а також для підвищення їхньої врожайності. Наші результати дослідження показали, що, наприклад, озима пшениця на території Миколаївської області характеризується помірно стійкими врожаями. А згідно з результатами дослідження, які висвітлені в роботі (Польовий і Божко, 2007), видно, що стійкі врожаї озимої пшениці можна одержувати в Лісостепу, а саме на території Львівської та Тернопільської областей. Також нашими дослідженнями

було встановлено, що найбільші площі на території Миколаївської області лежать під посівами озимої пшениці та соняшнику – 476,4 та 496,5 тис. га відповідно, хоча ці культури належать до помірно стійких урожаїв. Варто зазначити, що перевищення посівних площ під посівами соняшнику виснажує ґрунт і призводить до суттєвого зменшення врожайності культури та погіршення стану ґрунту. Схожі результати були отримані в роботі (Костюкевич і Колосовська, 2022), а саме: на території Лісостепової зони в розрізі областей перевищені допустимі норми вирощування соняшнику від 1,2 до 2,5 разів. Головною причиною розширення площ посіву під цією культурою став рівень рентабельності виробництва насіння соняшнику – 45,2%, у порівнянні з рентабельністю зернових – 25,3%.

Висновки

У роботі було виконано оцінку часової мінливості врожаїв основних сільськогосподарських культур (озима пшениця, озимий ріпак, ярий ячмінь, овес, кукурудза, соняшник) Миколаївської області. Установлено, що за досліджуваний період протягом 3 років спостерігалися від'ємні відхилення за всіма видами сільськогосподарських культур. Так, на початку розрахункового періоду врожай озимої пшениці за трендом становив 20,8 ц/га, а на кінець періоду (2021 р.) – 37,2 ц/га. У 2003 р. спостерігалось найбільше від'ємне відхилення – мінус 16 ц/га, а у 2004 р. найбільше позитивне – 11,1 ц/га. Наприклад, середня врожайність соняшнику становила 15,7 ц/га. Мінімальний урожай був зібраний у 2004 р. і дорівнював 8 ц/га, найбільший урожай був зібраний у 2013 р. – 21,5 ц/га. У 2020 р. було зафіксоване значне падіння врожаю соняшнику, а саме 15,8 ц/га.

Розрахунок погодного коефіцієнта варіації врожайності дозволив визначити якісні характеристики зон мінливості врожайності зернових культур і виділити такі градації для досліджуваних культур: озимий ріпак (0,06), ярий ячмінь (0,02) і кукурудза (0,09) – найстійкіші врожаї, озима пшениця (0,29) і соняшник (0,29) – помірно стійкі врожаї, овес (0,33) – нестійкі врожаї. Шляхом оптимізації виявлено, що культури, які відносять до найстійкіших урожаїв (ярий ячмінь, озимий ріпак), охоплюють незначні посівні площі на території області (79,4 тис. га та 60,06 тис. га відповідно). Найбільші площі лежать під посівами озимої пшениці (476,4 тис. га) і соняшнику (121,4 тис. га). Рекомендовано збіль-

шення площ кукурудзи та ярого ячменю та ком, зменшення площі озимої пшениці та помірно збільшення площі під озимим ріпаком, зменшення площі озимої пшениці та соняшнику на 15–20%.

Список використаної літератури

- Білоусько Т.Ю. Ефективність сільськогосподарського виробництва: досягнутий рівень та проблеми підвищення. *Вісник ХНАУ ім. В.В. Докучаєва*. 2013. № 6. С. 78–85.
- Бондаренко М.П., Собко М.Г., Романько Ю.О. та ін. Оптимізація структури посівних площ та використання коротко-ротаційних сівозмін. *Сад*, 2009. 16 с.
- Будзяк В. Економіко-екологічні принципи ефективного використання, охорони та відтворення земель сільськогосподарського призначення. *Економіка природокористування і охорони довкілля*. 2009. № 7. 25–33.
- Дмитренко В.П. Погода, клімат і урожай польових культур. Київ: Ніка-Центр. 2010. 234 с.
- Екологічний паспорт Миколаївської області. 2021 рік. Миколаїв, 2022 [Електронний ресурс]. URL: <https://ecolog.mk.gov.ua/ua/ecoreports/ecorpassport/> (дата звернення 25.08.2023).
- Костюкевич Т. К., Данілова Н. В., Колосовська В. В., Корень В. В. Сучасний стан та перспективи виробництва основних олійних культур в Україні. *Creative approaches in modern scientific and practical activities: collective monograph*. GS publishing service, California, USA. 2023. P. 9–15. <https://doi.org/10.51587/9798-9866-95990-2023-013>.
- Костюкевич Т.К., Колосовська В.В. Дослідження екологічних норм вирощування соняшнику в Лісостепу України. *Modern scientific strategies of development : collective monograph*. Sherman Oaks, California, USA. 2022. P. 15–20. <https://doi.org/10.51587/9781-7364-13395-2022-008>.
- Крочак О.І. Економічний зміст витрат виробництва. Розвиток підприємницької діяльності в контексті інтеграції України в світове господарство та інформації основних напрямків поступу: колективна наукова монографія. За ред. Н.О. Лисенко. Умань: Видавець Сочінський М.М. 2017. С. 198–201.
- Польовий А.М., Божко А.Ю. Довгострокові агрометеорологічні прогнози. Підручник. Київ. КНТ, 2007. 296 с.
- Польовий А.М., Божко А.Ю., Дронова О.О. Просторово-часова оцінка мінливості врожаїв озимої пшениці на території України. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2011. № 8. С. 84–91.
- Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Миколаївській області у 2021 році. Миколаїв, 2022 [Електронний ресурс]. URL: <https://ecolog.mk.gov.ua/ua/ecoreports/regionalreport/> (дата звернення 25.08.2023).
- Huet E.K., Adam M., Traore B., Giller K.E., Descheemaeker K. Coping with cereal production risks due to the vagaries of weather, labour shortages and input markets through management in southern Mali. *European Journal of Agronomy*. 2022. Vol. 140, art. no. 126587. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126587>
- Moussadek R., Laghrou M., Mrabet R., Ranset V. E. Crop Yields under Climate Variability and No-Tillage System in Dry Areas of Morocco. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2023. Vol. 24, Issue 1. P. 221–232. <https://doi.org/10.12912/27197050/155024>
- Putte V. D. A., Govers G., Diels J., Gillijns K., Demuzere M. Assessing the effect of soil tillage on crop growth: A meta-regression analysis on European crop yields under conservation agriculture. *European Journal of Agronomy*. 2010. Vol. 33 (3). P. 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.05.008>

References (translated & transliterated)

- Bilousko, T.Yu. (2013). Efektyvnist silskohospodarskoho vyrobnytstva: dosiahnutyi riven ta problemy pidvyshchennia [Efficiency of agricultural production: achieved level and problems of improvement]. *Visnyk KhNAU im. V. V. Dokuchaieva [Bulletin of the KhNAU named after V.V. Dokuchaev]*, 6, 78–85 [in Ukrainian].
- Bondarenko, M.P., Sobko, M.H., & Romanko, Yu O., et al. (2009). Optymizatsiia struktury posivnykh ploshch ta vykorystannia kortko-rotatsiinykh sivozmin [Optimization of the structure of sown areas and the use of short-rotational crop rotations]. *Sad [Garden]* [in Ukrainian].
- Budzyak, V. (2009). Ekonomiko-ekolohichni pryntsyipy efektyvnoho vykorystannia, okhorony ta vidtvorennia zemel silskohospodarskoho pryznachennia [Economic and environmental principles of efficient use, protection and reproduction of agricultural land]. *Ekonomika pryrodokorystuvannia*

i okhorony dovkillia [Economics of natural resource management and environmental protection], 7, 25-33 [in Ukrainian].

Dmytrenko, V.P. (2010). Pohoda, klimat i urozhai polovykh kultur [Weather, climate and crop yields]. Kyiv: Nika-Tsentr [in Ukrainian].

Ekolohichnyi pasport Mykolaivskoi oblasti. 2021 rik [Environmental passport of Mykolaiv region. 2021]. (2022). Mykolaiv. [Electronic resource] URL: <https://ecolog.mk.gov.ua/ua/ecoreports/ecopassport/> (access date 25.08.2023) [in Ukrainian].

Kostiukevych, T.K., Danilova, N.V., Kolosovska, V.V., & Koren, V.V. (2023) Suchasnyj stan ta perspektyvy vyrobnytstva osnovnykh olijnykh kul'tur v Ukraini [Suchasnyj stan ta perspektyvy proizvodnytstva osnovnykh olijnykh kul'tur v Ukraini]. Creative approaches in modern scientific and practical activities: collective monograph. GS publishing service, California, USA. <https://doi.org/10.51587/9798-9866-95990-2023-013> [in Ukrainian].

Kostiukievych, T.K., & Kolosovska, V.V. (2022). Doslidzhennia ekolohichnykh norm vyroshchuvannia soniashnyku v Lisostepu Ukrainy [Study of ecological norms of sunflower cultivation in the forest-steppe of Ukraine]. Modern scientific strategies of development: collective monograph. Sherman Oaks, California, USA. <https://doi.org/10.51587/9781-7364-13395-2022-008> [in Ukrainian].

Krochak, O.I. (2017). Ekonomichnyi zmist vytrat vyrobnytstva [The economic content of production costs]. Rozvytok pidpriemnytskoi diialnosti v konteksti intehratsii Ukrainy v svitove gospodarstvo ta informatsii osnovnykh napriamkiv postupu: kolektyvna naukova monohrafiia [Development of entrepreneurial activity in the context of Ukraine's integration into the world economy and information of the main directions of progress: a collective scientific monograph]. (Lysenko, N.O. Eds.). Uman, Vydavets Sochinskyi M. M. [in Ukrainian].

Polovyi, A.M., & Bozhko, L.Yu. (2007). Dovhostrokovi ahrometeorolohichni prohnozy. Pidruchnyk [Long-term agrometeorological forecasts. Textbook]. Kyiv, KNT [in Ukrainian].

Polovyi, A.M., Bozhko, L.Yu., & Dronova, O.O. (2011). Prostorovo-chasova otsinka minlyvosti vrozhaiv ozymoї pshenytsi na terytorii Ukrainy [Spatial-temporal assessment of the variability of winter wheat yields on the territory of Ukraine]. *Ukrainskyi hidrometeorolohichnyi zhurnal [Ukrainian Hydrometeorological Journal]*, 8, 84–91 [in Ukrainian].

Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha v Mykolaivskii oblasti u 2021 rotsi [Regional report on the state of the environment in Mykolaiv region in 2021] (2022). Mykolaiv. [Electronic resource] URL: <https://ecolog.mk.gov.ua/ua/ecoreports/regionalreport/> (access date 25.08.2023) [in Ukrainian].

Huet, E.K., Adam, M., Traore, B., Giller, K. E., & Descheemaeker, K. (2022). Coping with cereal production risks due to the vagaries of weather, labour shortages and input markets through management in southern Mali. *European Journal of Agronomy*, 140, 126587. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126587> [in English].

Moussadek, R., Laghrour, M., Mrabet, R., & Ranset, V.E. (2023). Crop Yields under Climate Variability and No-Tillage System in Dry Areas of Morocco. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 24 (1), 221–232. doi: <https://doi.org/10.12912/27197050/155024> [in English].

Putte, V.D.A., Govers, G., Diels, J., Gillijns, K., & Demuzere, M. (2010). Assessing the effect of soil tillage on crop growth: A meta-regression analysis on European crop yields under conservation agriculture. *European Journal of Agronomy*, 33 (3), 231-241. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.05.008> [in English].

Отримано: 11.09.2023

Прийнято: 02.10.2023



ЕКОЛОГІЯ

УДК 330.15:332.1:336.2:502/504

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.12>

ОЦІНЮВАННЯ ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ ЗЕЛЕНИХ НАСАДЖЕНЬ ПАРКУ КУЛЬТУРИ Й ВІДПОЧИНКУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА (МІСТО КРЕМЕНЕЦЬ) З ВИКОРИСТАННЯМ ІНСТРУМЕНТУ I-TREE ESO

О.Б. Бондар¹, Є. Є. Мельник², Л. О. Бицюра³, О. І. Дух⁴, О. М. Ярема⁵, В. В. Файфура⁶

¹ 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

² кандидат сільськогосподарських наук,
старший науковий співробітник сектору екології лісу
(Український орден «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

³ 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

⁴ кандидат біологічних, доцент,
доцент кафедри біології, екології та методик їх навчання
(Кременецька обласна гуманітарно-педагогічна академія імені Тараса Шевченка, м. Кременець)
e-mail: olja_dykh@ukr.net
ORCID: 0000-0003-3650-9813

⁵ кандидат біологічних наук,
доцент кафедри екології та охорони здоров'я
(Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль)
e-mail: jaremaom@tdmu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-6839-2253

⁶ кандидат економічних наук,
доцент кафедри екології та охорони здоров'я
(Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль)
e-mail: v.faufura@wunu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-4040-0028

Актуальність оцінювання екосистемних послуг зелених насаджень парку культури і відпочинку імені Т. Шевченка за допомогою інструменту *i-Tree Eco* полягає в тому, що це дозволяє науково обґрунтувати важливість зелених зон для міста, здоров'я громадян, а також визначити способи оптимізації догляду та розвитку парку, збалансувавши його роль як природного резервуара, місця для відпочинку та рекреації, а також ресурсу для покращення якості повітря та зменшення викидів вуглецю в місті. Це допомагає ухвалювати оптимальні рішення щодо управління та розвитку зеленої інфраструктури в контексті сталого розвитку та забезпечення комфортного життя міського населення.

Метою роботи є оцінка екосистемних послуг зелених насаджень парку культури і відпочинку імені Т. Шевченка з використанням інструменту *i-Tree Eco*.

Для аналізу екосистемних послуг зелених насаджень парку імені Т. Шевченка за допомогою інструменту *i-Tree Eco* можна використовувати такі методи, як збір і аналіз даних про розмір і стан дерев, оцінку кількості депонованого вуглецю, а також вимірювання їхнього впливу на якість повітря та міське середовище. Додатково можна провести оцінку вартості екосистемних послуг, як-от зменшення шуму та температури повітря, збереження водних ресурсів і поліпшення естетики парку, щоб визначити їх важливість для місцевого середовища.

У результаті досліджень під визначення екосистемних послуг виміряно 77 дерев. Так, найбільш поширеними видами є каштан кінський (*Aesculus hippocastanum* L.), липа дрібнолиста (*Tilia cordata* Mill.), береза бородавчаста (*Betula pendula* Roth.).

У розподілі розмірів дерев у парку культури і відпочинку імені Т. Шевченка спостерігається значна різноманітність. Більшість дерев (53,3%) мають діаметр у діапазоні від 18,1 до 30,0 см, тоді як приблизно третина (27,3%) перебуває в діапазонах 12,1–18,0 і 30,1–36,0 см. Лише невелика кількість дерев (14,3%) мають діаметр від 3,1 до 12,0 см.

Насадження парку має значний потенціал для деонування вуглецю та запобігання стоку. Він утримує 131,10 т вуглецю на загальну суму 657 184,21 гривень і зменшує стік на 40 812,45 га / рік на суму 10 611,23 гривень.

Наукова новизна цього дослідження полягає у використанні інструмента *i-Tree Eco* для оцінки екосистемних послуг у конкретному парку культури і відпочинку імені Т. Шевченка. Цей підхід дозволяє визначити конкретні екологічні користі та вартість зелених насаджень для цього конкретного місця, що може бути унікальним для даного парку та служити прикладом для подібних досліджень у таких місцях.

Проведення оцінки екосистемних послуг зелених насаджень парку культури і відпочинку імені Т. Шевченка з використанням інструменту *i-Tree Eco* сприятиме усвідомленню важливості та цінності парків у містах, допоможе виробити ефективні стратегії управління та збереження зелених зон, покращити якість життя місцевого населення.

Ключові слова: парк, екосистемні послуги, каштан кінський, береза бородавчаста, м. Кременець, вуглець, вид дерева, поверхневий стік.

ASSESSMENT OF ECOSYSTEM SERVICES OF GREEN SPACES IN THE T. SHEVCHENKO PARK OF CULTURE AND RECREATION (KREMENETS) USING THE I-TREE ECO

O. B. Bondar, Ye. Ye. Melnyk, L. O. Bytsiura, O. I. Dukh, O. M. Yarema, V. V. Faifura

The relevance of assessing the ecosystem services of the green spaces of the Taras Shevchenko Park for Culture and Recreation using the *i-Tree Eco* tool is that it allows to scientifically substantiate the importance of green areas for the city, the health of citizens, and to identify ways to optimize the care and development of the park, balancing its role as a natural reservoir, a place for rest and recreation, as well as a resource for improving air quality and reducing carbon emissions in the city. This helps to make informed decisions on the management and development of green infrastructure in the context of sustainable development and ensuring a comfortable life for the urban population. The aim of the study is to assess the ecosystem services of the green spaces of the Taras Shevchenko Park for Culture and Recreation using the *i-Tree Eco* tool.

The *i-Tree Eco* tool can be used to analyze the ecosystem services of the green spaces of Taras Shevchenko Park, such as collecting and analyzing data on the size and condition of trees, estimating the amount of carbon stored, and measuring their impact on air quality and the urban environment. Additionally, the value of ecosystem services such as noise and air temperature reduction, water conservation, and improved park aesthetics can be assessed to determine their importance to the local environment. The results of the research for the definition of ecosystem services included 77 trees. Thus, the most

common species are horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.), small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.), and warty birch (*Betula pendula* Roth.).

The distribution of tree sizes in the Taras Shevchenko Park for Culture and Recreation shows considerable diversity. The majority of trees (53,3%) have a diameter between 18,1 and 30,0 cm, while about a third (27,3%) are in the ranges of 12,1–18,0 cm and 30,1–36,0 cm. Only a small number of trees (14,3%) have a diameter between 3,1 and 12,0 cm.

The Park's plantation has a significant potential for carbon sequestration and runoff prevention. It holds 131,10 tons of carbon for a total of 657 184,21 UAH and reduces runoff by 40 812,45 ha/year for a total of 10 611,23 UAH.

The scientific novelty of this study is the use of the i-Tree Eco tool to assess ecosystem services in a specific Taras Shevchenko Park. This approach allows us to determine the specific environmental benefits and value of green spaces for this particular location, which can be unique to this park and serve as an example for similar studies in similar locations.

The assessment of the ecosystem services of the green spaces of the Taras Shevchenko Park for Culture and Recreation using the i-Tree Eco tool will contribute to the awareness of the importance and value of parks in cities, help to develop effective strategies for the management and conservation of green areas and improve the quality of life of the local population.

Key words: park, ecosystem services, horse chestnut, warty birch, Kremenets, carbon, tree species, surface runoff.

Вступ

Екосистемні послуги є невід'ємною частиною нашого природного середовища, надають користь людям і природі водночас. Особливо в міських областях зелені насадження відіграють важливу роль у забезпеченні різноманітних екосистемних послуг, які покращують якість життя місцевого населення та сприяють збереженню навколишнього середовища. Ці послуги включають зменшення рівня забруднення повітря, регулювання кліматичних процесів, підтримку біорозмаїття та створення естетичного оточення (Cimburova & Barton, 2020; Emily et al., 2020; Lin et al., 2021).

Оцінювання екосистемних послуг, наданих зеленими насадженнями, дуже важливе для розуміння їхньої суспільної вагомості, підтримки їх збереження та подальшого розвитку. Цей процес допомагає визначити, наскільки важливо зберігати зелені зони в міському середовищі, мотивує до вжиття заходів для їх підтримки, збереження та навіть покращення (Szkop, 2020; Yao et al., 2022).

Інструмент i-Tree Eco – це потужне програмне забезпечення, яке дозволяє обробляти дані, зібрані під час інвентаризації дерев і лісів. Цей інструмент ураховує інформацію про місцеве забруднення повітря та метеорологічні дані для визначення впливу лісової екосистеми на навколишнє природне середовище (I-Tree Eco, 2023).

Д. Бідолах і його колеги використали інструмент i-Tree Eco для інвентаризації дерев і кущів на ринку в місті Бережани Тернопільської області. Результати цієї інвентаризації показали, що вартість дерев-

но-кущової рослинності на цій території становить 4,993 млн доларів, що відображає річний внесок цих рослин у надання екосистемних послуг. Ці послуги включають зменшення забруднення навколишнього середовища, поглинання та зберігання вуглецю та регулювання водного стоку (Бідолах та ін., 2023).

О. Василюк і Л. Ільмінська розглянули концепцію «екосистемного добробуту» та розробили власну методологію оцінки екосистемних послуг, беручи до уваги унікальність українських біотопів. Вони також адаптували світову класифікацію екосистемних послуг CICES до українських умов і назвали її CICES-UA (Василюк і Ільмінська, 2023).

Аналіз концепції екосистемних послуг і їхню актуальність для сучасного суспільства відзначено Анною Варухою, яка розглянула методи оцінки економічної цінності цих послуг і їхній вплив на природне середовище (Варуха, 2022). У її праці також розглянуто можливість використання екосистемного підходу для визначення й оцінювання збитків для екосистем і біорозмаїття України в умовах військових конфліктів.

Матеріал і методи

Для оцінки екосистемних послуг насаджень у парку культури і відпочинку імені Т. Шевченка були виміряні такі характеристики, як: діаметр стовбура дерева (за допомогою мірної вилки), висота дерева (за допомогою висотоміра Анучіна), ширина крони (виміряна в північно-південному та західно-східному напрямках) і частка крони, де листя відсутнє. Після цього отримані значення були введені у програмний інструмент i-Tree Eco для автоматичного

аналізу й обробки даних. Схема-карта парку культури і відпочинку ім. Т. Шевченка зроблена за допомогою програми Google Maps (рис. 1).

Значення важливості розраховуються як сума відсотка популяції та відсотка площі листя. Це не означає, що ці дерева обов'яз-

ково треба заохочувати в майбутньому; радше ці види нині домінують у структурі міських лісів.

Результати та обговорення

Парк культури і відпочинку ім. Т. Шевченка розташований на вулиці Т. Шевченка (м. Кременець Тернопільської обл.). Загалом

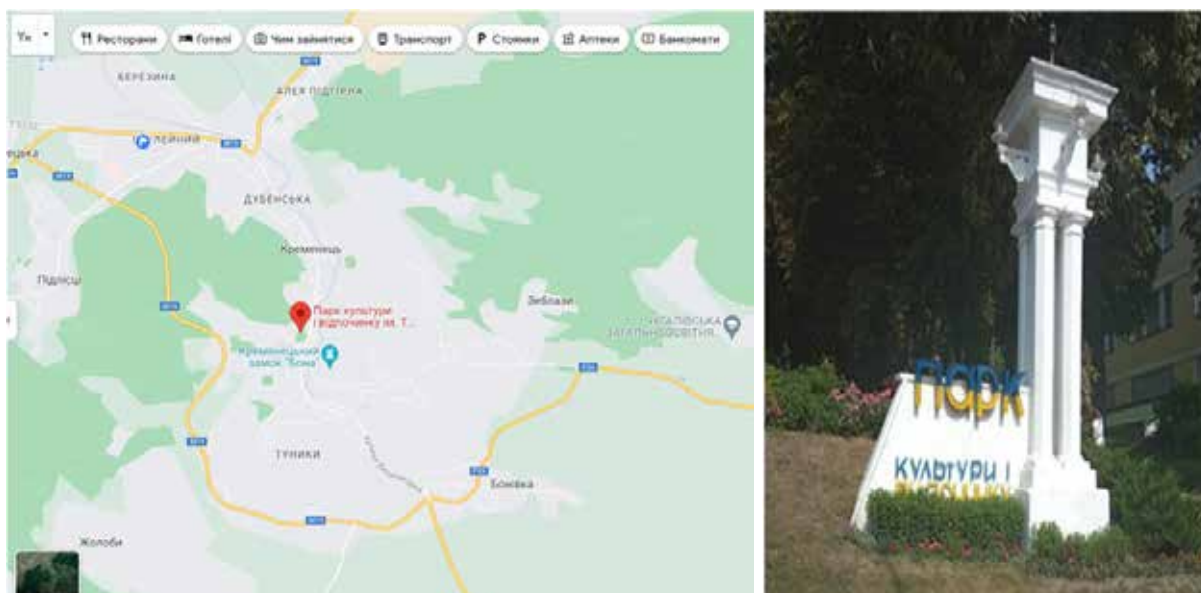


Рис. 1. Схема-карта розташування парку культури і відпочинку ім. Т. Шевченка

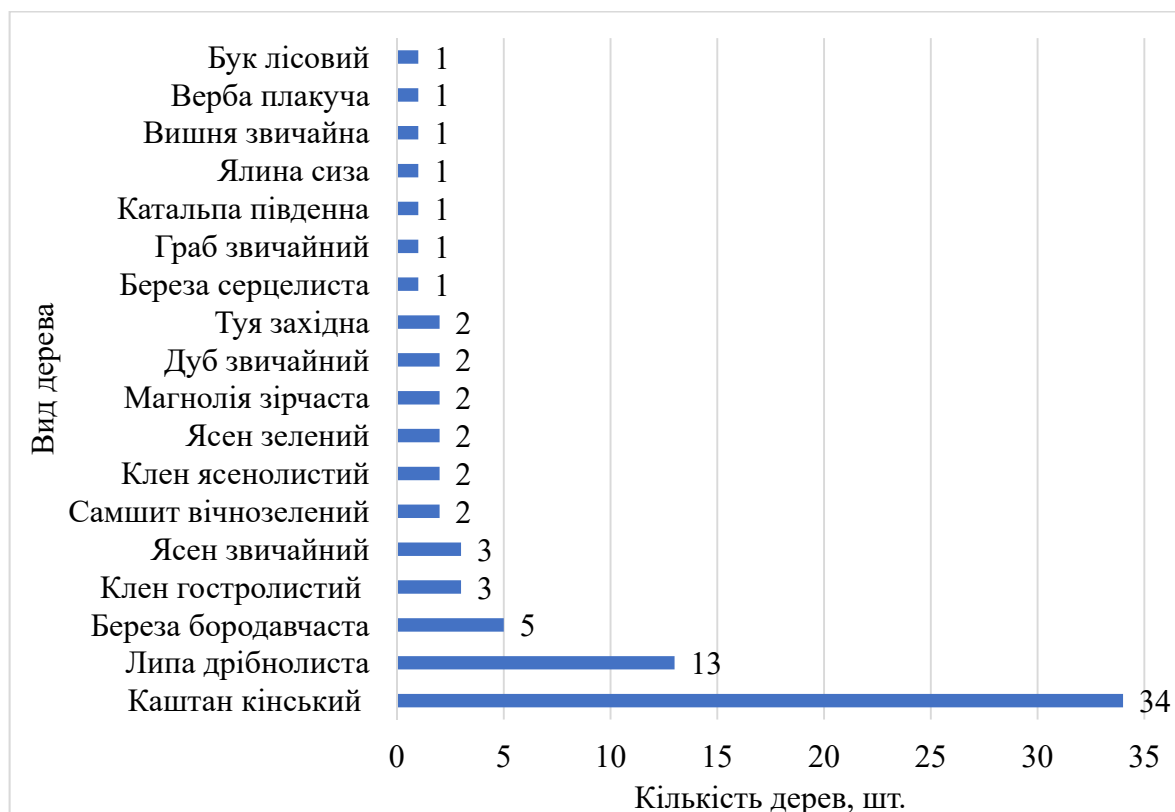


Рис. 2. Розподіл кількості дерев на території парку культури і відпочинку ім. Т. Шевченка

на даній території здійснили обмір 77 дерев (рис. 2). Видовий склад досить різноманітний, найбільш поширеними видами є каштан кінський (44,2%), липа дрібнолиста (16,9%) і береза дрібнолиста (6,5%). Інші види трапляються поодинокі.

Розподіл дерев за розмірами на території парку є різним (рис. 3). Більше половини дерев (53,3%) має діаметр від 18,1 до 30,0 см. Майже третина дерев (27,3%) має діаметр 12,1–18,0 і 30,1–36,0 см. Лише невелика частина дерев (14,3%) має діаметр від 3,1 до 12,0 см.

Міські лісові екосистеми являють собою складне поєднання місцевих та інтродукованих видів дерев, вони відзначаються вищим рівнем видового розмаїття, ніж традиційні природні ландшафти на місь-

ких територіях. Підвищена диверсифікація видів дерев може слугувати захистом від загальних впливів, як-от шкідливі комахи або захворювання, але водночас вона може створювати потенційні загрози для аборигенних рослин, якщо деякі інтродуковані види стають інвазійними та здатними конкурувати з автохтонними видами за ресурси та простір, що може призвести до їх витіснення з екосистеми.

За ареалом походження види дерев мають різну частку (рис. 4). Більше половини (59,7%) належать до Європейського й Азійського регіонів. З них 27,3% – європейські види. Походження з Північної Америки й Азії мають 10,4% видів. Ще 2,6% становлять дерева з невизначеним ареалом поширення.

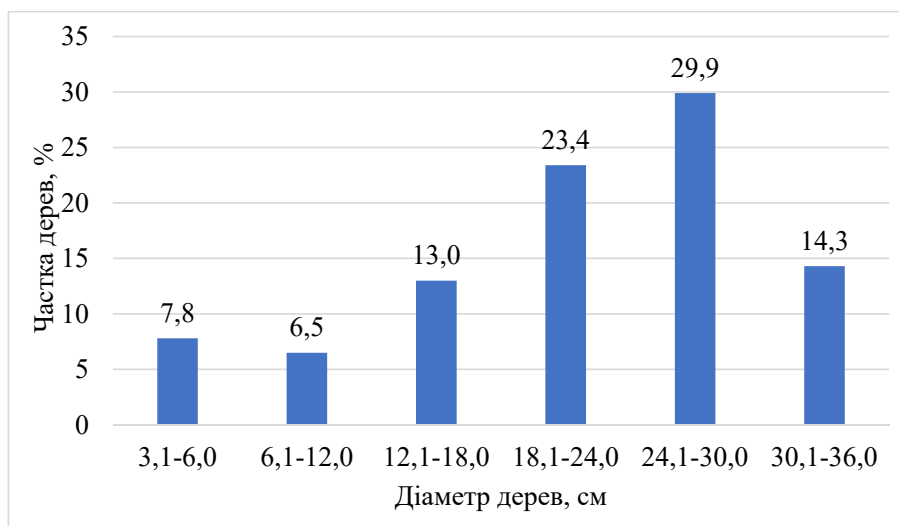


Рис. 3. Розподіл дерев за діаметром на території парку культури і відпочинку ім. Т. Шевченка

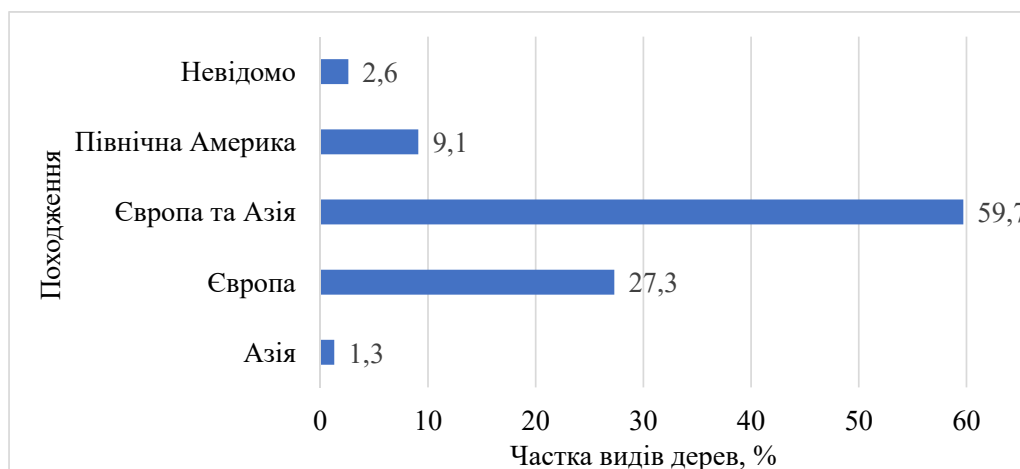


Рис. 4. Частка видів дерев за ареалом походженням на території парку культури і відпочинку ім. Т. Шевченка

Таблиця 1

Значення дерев за часткою листкової поверхні

Вид дерев	Частка листкової поверхні, %	Важливість
Каштан кінський	68,1	112,2
Липа дрібнолиста	8,3	25,2
Ясен звичайний	6,0	9,9
Береза бородавчаста	1,7	8,2
Клен гостролистий	2,9	6,8
Ясен зелений	3,5	6,1
Самшит вічнозелений	2,3	4,9
Клен ясенolistий	2,3	4,9
Магнолія зірчаста	0,6	3,2
Дуб звичайний	0,4	3,0
Катальпа південна	1,6	2,9
Туя західна	0,2	2,6
Граб звичайний	0,9	2,2
Вишня звичайна	0,5	1,8
Береза серцелиста	0,5	1,8
Ялина сиза	0,4	1,7
Верба плакуча	0,1	1,4
Бук лісовий	0,1	1,4

У парку відпочинку та культури ім. Тараса Шевченка за площею листкової поверхні домінують такі види, як каштан звичайний (68,1%), липа дрібнолиста (8,3%), ясен звичайний (6,0%) (табл. 1).

Дерева виконують важливу роль у біогеохімічному циклі вуглецю, оскільки вони усмоктують вуглекислий газ (CO₂) з атмосфери через процес фотосинтезу та перетворюють його на органічні речовини, які зберігаються в різних частинах дерева, як-от стовбури, гілки, листя та коріння. Окрім того, дерева виконують іншу корисну функцію, а саме захищають ґрунт від втрати вуглецю через ерозію, сприяють покращенню структури та родючості ґрунту, а також сприяють розвитку корисних мікроорганізмів та інших живих істот.

Насадження парку має значний потенціал для депонування вуглецю та запобігання стоку. Він утримує 131,10 т вуглецю на загальну суму 657 184,21 грн, зменшує стік на 40 812,45 га / рік на суму 10 611,23 грн. З 18 видів дерев, які роблять найбільший внесок у ці процеси, можна виділити такі: каштан кінський, липу дрібнолисту, клен гостролистий, ясен звичайний, ясен зелений, самшит вічнозелений, клен ясенolistий, катальпу південну та березу бородавчасту (табл. 2).

Дослідження було проведено в рамках ініціативи «Академія i-Tree4UA» Громадської

організації «Український екологічний клуб «Зелена хвиля». У рамках цього проєкту була

Таблиця 2

Накопичення вуглецю та запобігання стоку дерева

Вид дерева	Накопичення вуглецю		Запобігання стоку	
	т	грн	(га/рік)	(год/рік)
Самшит вічнозелений	4,06	20 339,87	940,52	244,54
Клен гостролистий	6,89	34 513,58	1 172,78	304,92
Клен ясенolistий	2,66	13 340,84	925,26	240,57
Каштан кінський	81,72	409 650,31	27 780,76	7 223,00
Береза бородавчаста	5,39	26 996,52	704,44	183,15
Береза серцелиста	1,71	8 577,14	187,42	48,73
Граб звичайний	1,16	5 802,94	364,80	94,85
Катальпа південна	2,15	10 782,74	657,39	170,92
Ясен зелений	4,13	20 689,07	1 425,77	370,70
Ясен звичайний	6,57	32 939,32	2 436,28	633,43
Магнолія зірчаста	0,08	414,99	251,25	65,32
Ялина сиза	0,15	736,20	154,21	40,09
Вишня звичайна	0,56	2 786,96	202,64	52,69
Дуб звичайний	0,17	847,48	169,25	44,00
Верба плакуча	0,01	56,83	24,31	6,32
Бук лісовий	0,25	1 255,91	24,16	6,28
Туя західна	0,11	533,42	12,55	3,26
Липа дрібнолиста	13,35	66 920,08	3 378,67	878,45
Разом	131,10	657 184,21	40 812,45	10 611,23



Рис. 5. Здійснення інвентаризації дерев

виконана інвентаризація дерев, що ростуть в парку імені Тараса Шевченка (рис. 5).

Перспективи подальших досліджень. Для оцінки екосистемних послуг парку ім. Тараса Шевченка за допомогою i-Tree Eco дослідники мають перспективи вивчити різні типи природних середовищ, порівняти їхній внесок у різних місцях. Також вони можуть дослідити вплив кліматичних змін на екосистеми, а також їхні функції та послуги. Іншими перспективами є розроблення ефективних заходів для охорони та покращення зелених територій у містах, створення детальних та індивідуальних планів управління парком на основі результатів оцінки екосистемних послуг для сталого розвитку та задоволення потреб мешканців міста.

Висновки

Результати досліджень, проведених для визначення екосистемних послуг, вказують на значну різноманітність розмірів дерев у парку культури і відпочинку ім. Т. Шевченка. За результатами вимірювань 77 дерев виявлено, що найпоширенішими видами є каштан кінський (*Aesculus*

hippocastanum L.), липа дрібнолиста (*Tilia cordata* Mill.) і береза бородавчаста (*Betula pendula* Roth).

Щодо розмірів, більшість дерев (53,3%) мають діаметр у діапазоні від 18,1 до 30,0 см, тоді як приблизно третина (27,3%) перебувають у діапазонах 12,1–18,0 і 30,1–36,0 см. Лише невелика кількість дерев (14,3%) мають діаметр від 3,1 до 12,0 см.

Важливо відзначити, що насадження в парку має значний потенціал для збереження (депонування) вуглецю та запобігання стоку. Воно вміщує 131,10 т вуглецю, що за вартістю становить 657 184,21 грн. Також парк сприяє зменшенню стоку на площі 40 812,45 га щорічно, що еквівалентно 10 611,23 грн економічних вигід.

Отже, парк відіграє важливу роль як у збереженні природного середовища, так і в економічному плані, робить значний внесок у збереження вуглецю та зменшення стоку. Результати цього дослідження підкреслюють необхідність дбайливого ставлення до парків і природних зон для забезпечення ними екосистемних послуг.

Список використаної літератури

i-Tree Eco [Електронний ресурс]. URL: <https://www.itreetools.org/tools/i-tree-eco> (дата звернення 20.09.2023).

Бідолах Д.І., Василюшин Р.Д., Миронюк В.В., Кузьович В.С., Підховна С.М. Оцінювання екосистемних послуг зелених насаджень з використанням інструменту i-Tree Eco. *Науковий вісник НАТУ України*. 2023, т. 33, № 2. С. 07–13. <https://doi.org/10.36930/4033Q201>

Варуха А. Огляд підходів з оцінки екосистемних послуг через призму їхнього застосування для визначення збитків, завданих військовими діями рф на території України. За заг. ред. О. Кравченко. Львів: «Компанія.Манускрипт», 2022. 56 с.

Василюк О., Варуха А., Куземко А., Мойсієнко І., Коломицев Г., Спрягайло О., Лаврінєнко Ка., Сіренко І., Чусова О., Садогурська С., Безсмертна О. Екосистемний добробут: методика оцінки екосистемних послуг непрямими методами. Чернівці : Друк Арт, 2023. 184 с.

Cimburova Z., Barton D.N. The potential of geospatial analysis and Bayesian networks to enable i-Tree Eco assessment of existing tree inventories, *Urban Forestry & Urban Greening*, 55, 2020, 126801, <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*, 61, 2020, 102356, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102356>.

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*, 60, 2021, 127062, <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127062>.

Szkop Z. Evaluating the sensitivity of the i-Tree Eco pollution model to different pollution data inputs: A case study from Warsaw, Poland, *Urban Forestry & Urban Greening*, 55, 2020, 126859, <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126859>.

Yao Y., Wang Y., Ni Z., Chen S., Xia B. Improving air quality in Guangzhou with urban green infrastructure planning: An i-Tree Eco model study, *Journal of Cleaner Production*, 369, 2022, 133372, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133372>.

References (translated & transliterated)

I-Tree Eco (2023) [Electronic resource] URL: <https://www.itreetools.org/tools/i-tree-eco> ((access date 20.09.2023) [in English]

Bidolakh, D.I., Vasylyshyn, R.D., Myroniuk, V.V., Kuzovych, V.S., & Pidkhovna S. M. (2023). Otsiniuvannia ekosystemnykh posluh zelenykh nasadzen z vykorystanniam instrumentu i-Tree Eco [Evaluation of ecosystem services of urban green spaces using i-Tree Eco tool]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy [Scientific Bulletin of UNFU]*, 33, 2. P. 07–13 [in Ukrainian].

Varukha, A. (2022). Ohliad pidkhodiv z otsinky ekosystemnykh posluh cherez pryzmu yikhnoho zastosuvannia dlia vyznachennia zbytkiv, zavdanykh viiskovymy diiamy rf na terytorii Ukrainy [Review of approaches to the assessment of ecosystem services through the prism of their application to determine the damage caused by the military actions of the Russian Federation on the territory of Ukraine] Lviv, «Kompaniia. «Manuskrypt»» [in Ukrainian].

Vasyliuk, O., Varukha, A., Kuzemko, A., Moisiienko, I., Kolomytsev, H., Spriahailo, O., Lavrinenko, Ka., Sirenko, I., Chusova, O., Sadoghurska, S., & Bezsmertna, O. (2023). Ekosystemnyi dobrobut: metodyka obrakhunku ekosystemnykh posluh nepriamymy metodamy [Ekosystemnyi dobrobut: metodyka obrakhunku ekosystemnykh posluh nepriamymy metodamy] Chernivtsi, Druk Art [in Ukrainian].

Cimburova, Z., & Barton, D.N. (2020). The potential of geospatial analysis and Bayesian networks to enable i-Tree Eco assessment of existing tree inventories, *Urban Forestry & Urban Greening*, 55, 126801, <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, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102356> [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, <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127062> [in English].

Szkop, Z. (2020). Evaluating the sensitivity of the i-Tree Eco pollution model to different pollution data inputs: A case study from Warsaw, Poland, *Urban Forestry & Urban Greening*, 55, 126859, <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126859> [in English].

Yao, Y., Wang, Y., Ni, Z., Chen, S., & Xia, B. (2022) Improving air quality in Guangzhou with urban green infrastructure planning: An i-Tree Eco model study, *Journal of Cleaner Production*, 369, 133372, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133372> [in English].

Отримано: 25.09.2023
Прийнято: 16.10.2023



УДК 630*18 (477.42)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.13>

ЕКОЛОГІЧНИЙ СТАН ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ ДОЧІРНЬОГО ПІДПРИЄМСТВА «КОРОСТИШІВСЬКИЙ ЛІСГОСП АПК» ЗА ПОКАЗНИКАМИ СТАНУ Й ДИНАМІКИ ЛІСОВОГО ФОНДУ

Л. О. Герасимчук¹, Р. А. Валерко², В. Б. Станчик³

Ліси посідають значне місце в Порядку денному до 2030 року та є об'єктами сталого розвитку. Оцінка стану лісових екосистем є важливою для моніторингу прогресу в досягненні Цілей сталого розвитку, визначення внеску країн у Паризьку угоду про зміну клімату, Глобальні лісові цілі та 6 цілей Стратегічного плану Організації Об'єднаних Націй для лісів на 2017–2030 роки. Метою досліджень стала оцінка екологічного стану лісових екосистем Дочірнього підприємства «Коростишівський лісгосп АПК» за показниками стану та динаміки лісового фонду. Інформаційною базою досліджень стали матеріали Дочірнього підприємства «Коростишівський лісгосп АПК» Житомирського обласного комунального агролісгосподарського підприємства «Житомироблагроліс». Результати досліджень можуть бути використані у проектуванні майбутнього лісовпорядкування та для планування стратегії розвитку підприємства. Установлено, що серед порід дерев переважають сосна (5 306,8 га) і дуб звичайні (2 436,5 га) – 33,8 та 15,5% відповідно; середній клас бонітету – 1,53, панівні повноти – 0,5–4 814,6 га (30,7%) і 0,6–4 965,8 га (31,7%); молодняки, середньовікові, пристиглі, стиглі та перестійні охоплюють 20,8, 64,5, 8,1 та 6,6% площі лісгоспу, а нерівномірний розподіл площ деревних порід за групами віку зумовив відмінності наявного розподілу від оптимального; серед типів лісу домінують В2ДС (5 054,9 га). Найбільш поширеними хворобами лісу є коренева (2 014,7 га) і соснова (25,5 га) губки. За ревізійний період мало місце 40 пожеж на площі 27,5 га, середній клас пожежної небезпеки території – 2,8

¹ кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри екології та природоохоронних технологій
(Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир)
e-mail: gerasim4uk@ukr.net
ORCID: 0000-0002-3166-5588

² кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри екології та природоохоронних технологій
(Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир)
e-mail: valerko_ruslana@ukr.net
ORCID 0000-0003-4716-0100

³ лісничий
(Дочірнє підприємство «Коростишівський лісгосп АПК» Житомирського обласного комунального підприємства «Житомироблагроліс», м. Коростишів)
здобувач освітнього ступеня «магістр»
(Поліський національний університет, м. Житомир)
e-mail: at23092018aa@gmail.com
ORCID: 0009-0009-8641-5867

(землі 1-го класу мають площу у 2 624,9 га, 2-го – 4 775,1 га, 3-го – 4 750,2 га, 4-го – 5 098,7 га, 5-го – 705,8 га). Стан і динаміка лісового фонду дають можливість загалом оцінити екологічний стан лісів як задовільний. Серед позитивних сторін ведення лісового господарства: 1) відповідність проекту лісовпорядкування; 2) покращення структури лісового й експлуатаційного фонду: загальний запас на 1 га вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок зріс на 28 м³, або 16%, запас стиглих насаджень – на 37 м³, або 25,3%, збільшилася площа стиглих і пристиглих насаджень; 3) своєчасне проведення лісовідновних заходів на зрубках, створення лісових культур господарсько цінних деревних порід на площі 1 303,5 га, із них 1-го і 2-го класу якості 77,5%, відсутність незадовільних лісових культур; 4) відсутність втрат деревини під час проведення рубок головного користування; 5) відсутність лісових пожеж в останні три роки ревізійного періоду.

Ключові слова: лісовий фонд, бонітет, повнота, групи віку, хвороби, пожежі, задовільний екологічний стан.

ENVIRONMENTAL STATE OF FOREST ECOSYSTEMS OF THE SUBSIDIARY ENTERPRISE “KOROSTYSHIV FOREST FARM OF AGRICULTURE” ACCORDING TO INDICATORS OF THE STATE AND DYNAMICS OF THE FOREST FUND

L. O. Herasymchuk, R. A. Valerko, V. B. Stanchyk

Forests occupy a significant place in the 2030 Agenda and are objects of sustainable development. Assessing the state of forest ecosystems is important for monitoring progress in achieving the Sustainable Development Goals, determining countries' contributions to the Paris Agreement on Climate Change, the Global Forest Goals and the 6 Goals of the UN Strategic Plan for Forests 2017–2030. The purpose of the research was to assess the ecological state of the forest ecosystems of the Subsidiary enterprise “Korostyshiv Forest Farm of Agriculture” according to indicators of the state and dynamics of the forest fund. The information base of the researches became the metrails of the Subsidiary enterprise “Korostyshiv Forest Farm of Agriculture” of the Zhytomyr Regional Communal Agroforestry Enterprise “Zhytomyroblagrolis”. The research results can be used in the design of the next forest management and planning of enterprise development strategies. It was established that the predominant species of trees are pine (5 306,8 ha) and common oak (2 436,5 ha) – 33,8 and 15,5%, respectively; average class of bonity – 1,53, dominant totality – 0,5 – 4 814,6 ha (30,7%) and 0,6–4 965,8 ha (31,7%); young, middle-aged, ripe, ripe and overwintering trees occupy 20,8, 64,5, 8,1, and 6,6% of the area of the forest farm, and the uneven distribution of the area of tree species by age groups caused differences between the existing distribution and the optimal one; among forest types, B2DS (5 054,9 ha) is dominant. The most widespread forest diseases are root (2 014,7 ha) and pine (25,5 ha) fungi. During the audit period, there were 40 fires on an area of 27,5 hectares, the average fire hazard class of the territory – 2,8 (1'st class lands have an area of 2 624,9 hectares, 2'nd – 4 775,1 ha, 3'rd – 4 750,2 ha, 4'th – 5 098,7 ha, 5–705,8 ha). The condition and dynamics of the forest fund make it possible to assess the ecological condition of forests as satisfactory in general. Among the positive aspects of forestry management are: 1) compliance with the forest management project; 2) improvement of the structure of the forest and exploitation fund: the total stock per 1 ha of forest plots covered with forest vegetation increased by 28 m³, or 16%, the stock of mature plantations – by 37 m³, or 25,3%, the area of mature and mature plantations increased; 3) timely carrying out of reforestation measures at log cabins, creation of forest crops of economically valuable tree species on an area of 1 303,5 ha, of which 77,5% are of 1'st and 2'nd quality class, absence of unsatisfactory forest crops; 4) no loss of wood during felling for main use; 5) absence of forest fires in the last three years of the audit period.

Key words: forest fund, creditworthiness, completeness, age groups, diseases, fires, satisfactory ecological condition.

Вступ

Ліси посідають значне місце в Порядку денному до 2030 р. та є об'єктами сталого розвитку (15 ціль сталого розвитку). Значення лісових екосистем важко недооцінити: вони – джерело їжі, ліків, біопалива для понад 1 млрд населення, володіють

захисними функціями, містять понад три чверті світового наземного біорозмаїття, протидіють сучасній зміні клімату, сприяють соціально-економічному розвитку територій, забезпечують робочими місцями, приносять прибуток для десятків мільйонів людей. Достовірною інформацією про стан

лісових екосистем є надзвичайно важливою для моніторингу прогресу в досягненні Цілей сталого розвитку на національному рівні, а також визначення внеску країн у Паризьку угоду про зміну клімату, Глобальні лісові цілі та 6 цілей стратегічного плану ООН для лісів на 2017–2030 рр. Загальна площа лісів у світі – 4,06 млрд га (еквівалентно 0,52 га на людину), що становить 31% площі землі, проте їх площі зменшуються (з 1990 р. втрати становили 178 млн га, що дорівнює території Лівії), як і загальний запас (з 560 млрд м³ у 1990 р. до 557 млрд м³ у 2020 р.) (Global ..., 2020). Лісові екосистеми піддані багатьом деградаційним процесам (пожежі, пошкодження шкідниками, хворобами та погодними явищами), що негативно впливають на них і призводять до нездатності повною мірою виконувати екосистемні функції.

Лісові екосистеми є об'єктом досліджень як українських, так і зарубіжних учених. Зокрема, сучасний стан лісів вивчали (Naarala et al., 1996; Maes et al., 2023; Guo et al., 2023; Мельник-Шамрай, Шамрай, 2022); складнощі у визначенні деградації лісів досліджували (Morales-Barquero et al., 2014; Ahrends, 2010; Golar et al., 2022); методи оцінки та прогнозування якості лісових екосистем розглядали (Kassim et al., 2016; Guo et al., 2023); вплив навколишнього середовища на стан лісових насаджень і адаптацію лісу до екстремальних умов і змін клімату вивчали (Altieri et al., 2023; Triviño et al., 2023); екосистемні послуги лісів – (Валерко та ін., 2023; Валерко і Герасимчук, 2017); державний нагляд (контроль) у сфері охорони лісів – (Герасимчук та ін., 2023), вплив підприємств лісового господарства на довкілля оцінювали (Герасимчук та ін., 2023). Широкою є й географія досліджень лісів: Європа (Maes et al., 2023), Китай (Guo et al., 2023), Румунія (Geacu et al., 2018), Мексика (Morales-Barquero et al., 2014), Танзанія (Ahrends et al., 2010), Німеччина (Jenssen et al., 2021), Індонезія (Golar et al., 2022), Фінська затока (Naarala et al., 1996), південь Швеції (Olofsson & Jakobsson, 2023), України (Селінний, Корма, 2019), зокрема Житомирської області (Валерко та ін., 2023; Герасимчук та ін., 2023).

Незважаючи на значну кількість публікацій щодо стану лісового господарства загалом, оцінці стану лісових екосистем в умовах окремих лісових господарств не приділено досить уваги, що і зумовило вибір теми дослідження.

Матеріал і методи

Інформаційною базою досліджень стали матеріали ДП «Коростишівський лісгосп АПК» Житомирського обласного комунального агролісогосподарського підприємства «Житомироблагроліс». Визначення показників стану та динаміки лісового фонду проводили за загальноприйнятими методами: поділ лісів на категорії – на підставі постанови Кабінету Міністрів України від 16 травня 2007 р. № 733; для визначення основних таксаційних показників закладалися пробна площа розміром 0,3 га (установлювали форму деревостану, склад, вік, середню висоту, клас бонітету, зімкнутість крон і запас, відмічали дерева, уражені фіто- й ентомошкідниками); склад деревостану визначали за десятибальною шкалою, де у 10 балів оцінюється запас усіх порід насадження; вік насадження встановлювали шляхом підрахунку річних кілець на пеньках спиляних дерев; повноту насаджень – як частку від ділення суми площ поперечного перерізу дерев пробної площі до сум площ поперечного перерізу нормального повного насадження; бонітет лісу – за Орловим (1911 р.); ступінь пожежної небезпеки території – за Правилами пожежної безпеки в лісах України від 27 грудня 2004 р. № 278.

Результати та обговорення

ДП «Коростишівський лісгосп АПК» розташований у північно-східній частині Житомирської області на території Житомирського (9 663,6 га) та Бердичівського (8291,1 га) районів (колишніх Коростишівського, Брусилівського, Попільнянського, Андрушівського, Ружинського районів), а до складу його входить 5 лісництв: Старосілецьке (3 657,5 га), Шахворостівське (4 633,6 га), Попільнянське (3 170,2 га), Брусилівське (2 125,9 га) і Андрушівське (4 367,5 га), які становлять 20,4, 25,8, 17,6, 11,8 і 24,3% площі лісгоспу відповідно. Лісистість районів – 22,0%. Клімат району розташування лісгоспу є сприятливим для росту основних деревних порід, що підтверджує наявність насаджень I-го і вище бонітетів. Бідні борові типи ґрунтів, на яких росте сосна низьких класів бонітету, змінюються багатими суглинками, де зростає дуб II і III класів бонітету. Панівними є дерново-підзолисті ґрунти. Ерозійні процеси на території лісгоспу розвинуті слабо (береги річок). За ступенем вологості ґрунти свіжі (1,9% площі лісових ділянок із надмірним зволоженням), болота

охоплюють 340,1 га, надмірно зволожені та заболочені лісові ділянки – 3 379,5 га (лісові ділянки в типах лісу В₄, В₅, С₄, С₅, Д₄, Д₅).

Наявний поділ лісів на категорії такий: ліси природоохоронного, наукового, історико-культурного призначення – 19,8 га (1% території); рекреаційно-оздоровчі ліси – 2 946,1 га (16%), з них ліси в межах населених пунктів – 82,6 га, лісгосподарська частина лісів зелених зон – 2 863,5 га; захисні ліси – 9 391,6 га (52%), з них полезахисні лісові смуги – 957,8 га, ліси протиерозійні – 255,8 га, ліси уздовж смуг відведення залізниць – 177,4 га, ліси уздовж смуг відведення автомобільних доріг – 135 га, ліси уздовж водних об'єктів – 1 767,1 га, байрачні ліси – 140,7 га, інші захисні ліси – 5 957,8 га; експлуатаційні ліси – 5 597,2 га (31%).

На території лісгоспу маємо 1 пам'ятку природи місцевого значення площею 19,8 га («Грабчаковий ліс», Старосілецьке лісництво, кв. 1, вид. 10, 13) і 5 заказників місцевого значення площею 133,4 га («Урочище Смульське», «Урочище Пасічне» (Шахворостівське лісництво), «Голубіївський ліс», «Трубіївський ліс», «Яроповицький» (Андрушівське лісництво)).

Лісові ділянки у практичній діяльності використовуються ефективно, ведеться інтенсивна господарська діяльність, про що свідчить збільшення на 882,3 га площі не вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок (незімкнутих лісових культур – на 438,3 га, зрубів – на 666,1 га, лісових шляхів і протипожежних розривів – на 27,2 га, розсадників – на 4,1 га, а також зменши-

лись галявини – на 220,4 га), поліпшення середніх таксаційних показників.

За минулий ревізійний період (2006–2016 рр.) питома вага сосни звичайної зменшилась на 21,4%, а дуба високостовбурного збільшилась на 1,3%. За окремими культурами збільшення площі на 30,9 га та загального запасу на 108,7 тис. м³ було характерне для дуба звичайного, на 51,4 га та 1,35 тис. м³ – дуба черешчатого, 2,15 тис. м³ – граба звичайного, 4,3 га та 5,07 тис. м³ – ясеня звичайного, 8,9 га та 1,32 тис. м³ – ясеня зеленого, 21,3 га і 9,32 тис. м³ – клена гостролистого, 9,1 га і 0,9 тис. м³ – клена-явора, 44,2 га і 10,45 тис. м³ – акації білої, 31,95 тис. м³ – вільхи чорної, 1,1 га і 4,73 тис. м³ – липи дрібнолистої, 1,3 га і 0,49 тис. м³ – тополі білої, 8,9 га і 1,95 тис. м³ – тополі канадської, 49,2 га і 0,51 тис. м³ – абрикоса звичайного. Загалом по лісництву площа вкритих лісовою рослинністю земель зменшилась на 2 301,8 га, загальний запас збільшився на 29,98 тис. м³, середній запас – на 28 тис. м³.

За панівними породами сосна звичайна переважає – 5 306,8 га (в осередках кореневої губки – 2 660,2 га), вільха чорна займає площу 2 740,3 га, дуб звичайний – 2 436,5 га (рис. 1).

За класами бонітету переважає 1 клас – 41,3% (6 505 га); на 2 клас припадає 30,9%, 1-А – 16,9%, 3 – 8,8%, 1-Б і 4 – 0,7%, 5 – 0,6%, 5-А – 0,1%. Наявність на площі 117,4 га низькобонітетних (5 і нижче класів бонітету) насаджень пояснюється надмірною вологістю ґрунтів і їхньою бідністю (рис. 2 (а)).

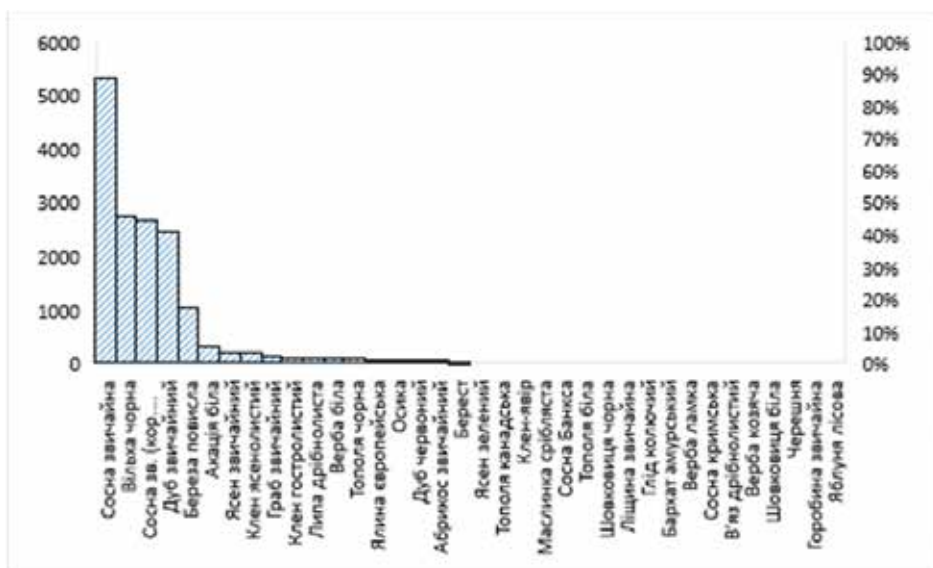


Рис. 1. Розподіл деревних порід лісництва за площею (га)

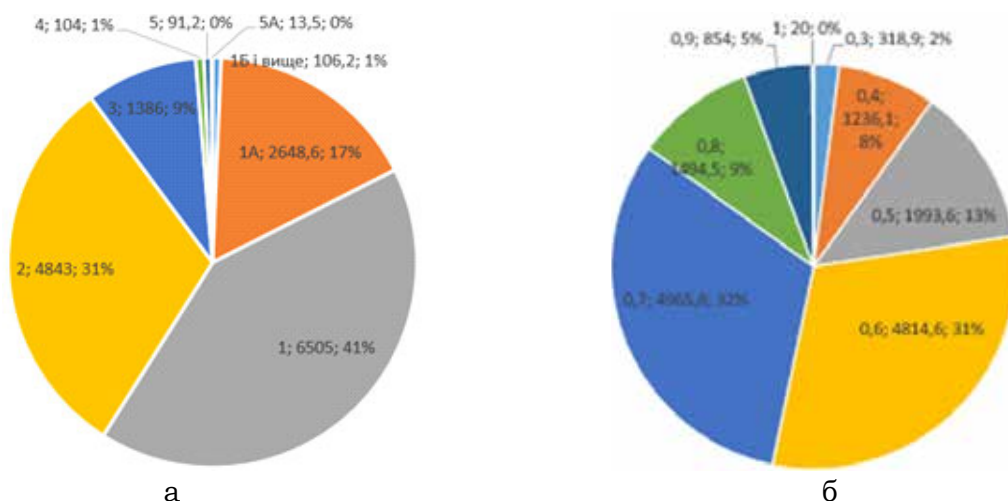


Рис. 2. Розподіл вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок за класами бонітету (а) та за повнотами (б)

У лісгоспі панівними повнотами є 0,5–4 814,6 га (або 30,7%) і 0,6–4 965,8 га (або 31,7%). Ураження сосни кореневою губкою, а також господарська діяльність зумовили наявність насаджень із повнотами 0,3–0,4 на площі в 1 555,0 га (9,9%) (0,3–318,9 га, 0,4–1 236,1 га) (див. рис. 2(б)).

Молодняки мають площу у 3 736,5 га, середньовікові – 11 598,9 га, пристиглі – 1 461,1 га, стиглі та перестійні – 1 192,9 га, що становить 20,8, 64,5, 8,1 та 6,6% площі. Площа основних груп порід за групами віку зазнала позитивних змін: зменшилась на 1 567,1 га площа молодняків, на 2 518,3 га середньовікових насаджень, збільшилась на 932,3 га площа пристиглих і на 848,1 га стиглих насаджень.

Нерівномірний розподіл площ деревних порід за групами віку зумовив відмінності наявного розподілу від оптимального (рис. 3).

Серед типів лісу домінує В2ДС (5 054,9 га). Насадження, які не відповідають типам лісу, мають площу 3 766,9 га (24% лісових ділянок).

Коренева (2 014,7 га) і соснова (25,5 га) губки – найбільш поширені хвороби лісу за ревізійний період (також наявні трутовик несправжній осиковий – 9,5 га, поперечний рак дуба – 1 га, трутовик дубовий – 0,9 га). Зазначимо, що запроектовані лісозахисні заходи виконані в повному обсязі.

Проект лісовпорядкування за способами відтворення лісів виконаний на 100% лише зі сприяння природному поновленню. Не виконані пропозиції лісовпорядкування із природного поновлення, а пропозиції лісовпорядкування зі створення лісових культур перевиконані на 60%. Не проектувались, але створені лісові культури: ялини європейської, дуба червоного, акації білої, ясена звичайного, береста, горіха чорного, вільхи

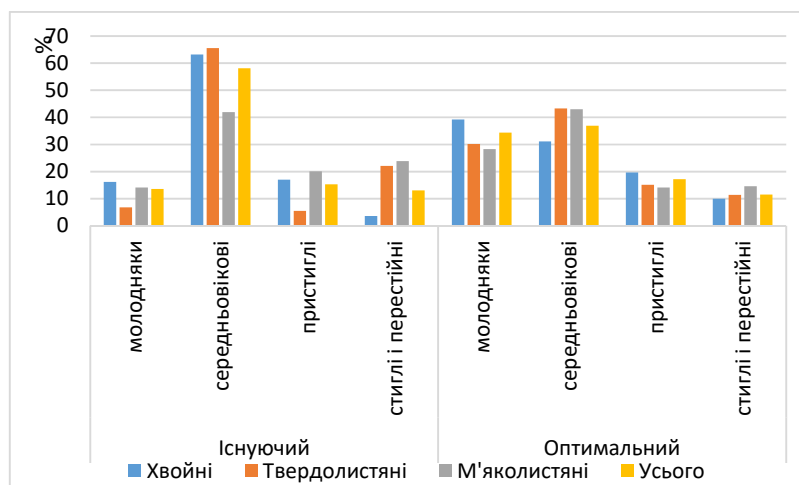


Рис. 3. Існуючий і оптимальний розподіл деревостанів за групами віку (%)

чорної, глоду колючого. Не виконаний проєкт лісовпорядкування зі створення лісових культур дуба звичайного, що пов'язано з відсутністю жолудів через рідке плодоношення дуба звичайного.

Сприяння природному поновленню проводилось шляхом мінералізації ґрунту на площі 7,3 га. Ефективність проведеного заходу хороша.

Постійний розсадник відсутній, є 0,8 га тимчасових розсадників, продуктивна площа яких становить 0,77 га, а кількість вирощених щорічно сіянців у них за останні два роки – у середньому 0,733 млн шт., зокрема за породами: сосна звичайна – 464,2 тис. шт., дуб червоний – 264,2 тис. шт., ліщина звичайна – 4,0 тис. шт., дуб звичайний – 0,6 тис. шт. Для виконання робіт з відтворення лісів потреба підприємства в насінні за останні два роки в середньому становила 4 576 кг (дуб звичайний – 4 000 кг, горіх чорний – 500 кг, ялина колюча – 5 кг). Заготівля насіння проводилась у нормальних насадженнях, власних або в державному лісгоспі.

Протягом ревізійного періоду мало місце 40 пожеж на площі 27,5 га, а їхніми причинами були вина населення (24 випадки) та сільськогосподарські пали (11 випадків). Середній клас пожежної небезпеки території – 2,8 (землі 1-го класу мають площу у 2 624,9 га, 2-го – 4 775,1 га, 3-го – 4 750,2 га, 4-го – 5 098,7 га, 5-го – 705,8 га) (табл. 1).

За два останні роки, у середньому, було зареєстровано 2 випадки самовільних рубок з обсягом зрубаної деревини 17 м³ із збитками 80,2 тис. грн, матеріали щодо цього були направлені для стягнення збитків.

Серед позитивних аспектів ведення лісового господарства: 1) відповідність проєкту лісовпорядкування; 2) покращення структури лісового й експлуатаційного фонду: загальний запас на 1 га вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок зріс на 28 м³, або 16%, запас стиглих насаджень – на 37 м³,

або 25,3%, збільшилася площа стиглих і пристиглих насаджень; 3) своєчасне проведення лісовідновних заходів на зрубках, створення лісових культур господарсько цінних деревних порід на площі 1 303,5 га, з них 1 і 2 класу якості 77,5%, відсутність незадовільних лісових культур; 4) відсутність втрат деревини під час проведення рубок головного користування; 5) відсутність лісових пожеж в останні три роки ревізійного періоду.

Проте необхідним є забезпечення усунення негативних сторін ведення лісового господарства шляхом ужиття таких заходів, як: 1) належний догляд за кварталними просіками та межами лісгоспу, кварталними стовпами; 2) своєчасне проведення вибіркових санітарних рубок із метою ненакопичення сухостійного лісу; 3) більша увага до створення постійної насінневої бази для заготівлі селекційного насіння та вирощування селекційного садивного матеріалу; 4) роз'яснювальна робота з місцевими жителями щодо запобігання пожежам, незаконним рубкам і негативному впливу на лісові екосистеми.

Висновки

Стан і динаміка лісового фонду дають можливість загалом оцінити екологічний стан лісів ДП «Коростишівський лісгосп АПК» Житомирського обласного комунального агролісогосподарського підприємства «Житомироблагроліс» як задовільний. Переважають такі породи дерев: сосна та дуб звичайні (33,8 і 15,5% площі відповідно); середній клас бонітету – 1,53; панівними повнотами є 0,5–30,7% і 0,6–31,7%; молодняки охоплюють 20,8%, середньовікові – 64,5%, пристиглі – 8,1%, стиглі та перестійні – 6,6% площі; серед типів лісу домінує В2ДС (5 054,9 га). Коренева (2 014,7 га) і соснова (25,5 га) губки – найбільш поширені хвороби лісу за ревізійний період. За ревізійний період мало місце 40 пожеж на площі 27,5 га, середній клас

Таблиця 1

Класи пожежної небезпеки земель та їхня площа, га

Лісництво	Класи пожежної небезпеки					Разом	Середній клас
	1	2	3	4	5		
Старосілецьке	820,3	1 494,3	507,4	695,1	140,4	3 654,5	2,40
Шахворостівське	507,9	1 343,4	1 646,5	968,7	167,1	4 633,6	2,77
Брусилівське	438,1	760,1	238,4	609,8	79,5	2 125,9	2,59
Андрушівське	189,4	240,7	1 694,7	2 096,9	145,8	4 367,5	3,40
Попільнянське	669,2	936,6	663,2	728,2	173,0	3 170,2	2,62
Разом	2 624,9	4 775,1	4 750,2	5 098,7	705,8	17 954,7	2,80

пожежної небезпеки території – 2,8 (землі 775,1 га, 3-го – 4 750,2 га, 4-го – 5 098,7 га, 1-го класу мають площу у 2 624,9 га, 2-го – 4 5-го – 705,8 га).

Список використаної літератури

Валерко Р., Герасимчук Л., Радучич А., Іваненко Р. Екосистемні послуги лісів філії «Словечанське лісове господарство» ДП «Ліси України». *Науковий вісник Вінницької академії безперервної освіти. Серія «Екологія. Публічне управління та адміністрування»*. 2023. № 3. С. 71–76. <https://doi.org/10.32782/2786-5681-2023-3.09>.

Валерко Р.А., Герасимчук Л.О. Оцінка стану лісових насаджень в умовах ДП «Зарічненське лісове господарство» як природного фактору стабілізації довкілля. *Вісник ХНАУ*. 2017. № 1. С. 172–178.

Герасимчук Л., Медведовський Є., Валерко Р. Державний нагляд (контроль) у сфері охорони, захисту, використання та відтворення лісів на території Житомирської області. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2023. № 4. С. 38–47. <https://doi.org/10.32782/pcsd-2022-4-4>.

Герасимчук Л.О., Валерко Р.А., Літвін А.В. Оцінка впливу на довкілля підприємств лісового господарства. *New factors for the development of natural sciences in Ukraine and EU countries: Scientific monograph*. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2023. С. 72–92. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-288-3-4>.

Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В.І. Оцінка екологічного стану соснових насаджень зони безумовного відселення у вологих суборах лісів Українського Полісся. *Екологічні науки*. 2022. № 5(44). С. 224–232. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.34>.

Селінний М.М., Корма О.М., Лісове господарство України: сучасний стан та перспективи розвитку. *Modern Economics*. 2019. № 17. С. 211–217. [https://doi.org/10.31521/modecon.V17\(2019\)-34](https://doi.org/10.31521/modecon.V17(2019)-34).

Ahrends A., Burgess N.D., Milledge S.A.H., Bulling M.T., Fisher B., Smart J.C.R., Clarke G.P., Mhoro B.E., Lewis S.L. Predictable waves of sequential forest degradation and biodiversity loss spreading from an African city. *PNAS*. 2010. Vol. 107. № 33. P. 14556–14561. <https://doi.org/10.1073/pnas.0914471107>.

Altieri S., Valor T., Battipaglia G. Editorial: Forest adaptation to extreme environments and climate changes. *Front. Ecol. Evol.* 2023. Vol. 11:1230753. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1230753>.

Geacu S., Dumitrașcu M., Grigorescu I. On the biogeographical significance of protected forest areas in southern Romania. *Sustainability*. 2018. Vol. 10. № 7:2282. <https://doi.org/10.3390/su10072282>.

Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. Rome. FAO, 2020. 186 p. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>.

Golar G., Muis H., Akhbar A., Khaeruddin C. Threat of forest degradation in Ex-Forest Concession Right (HPH) in Indonesia. *Sustainability and Climate Change*. 2022. Vol. 15. № 1. P. 216–223. <https://doi.org/10.1089/scc.2022.0019>.

Guo K., Wang B., Niu X. A Review of research on forest ecosystem quality assessment and prediction methods. *Forests*. 2023. Vol. 14. № 2:317. <https://doi.org/10.3390/f14020317>.

Guo Y., Ma X., Zhu Y., Chen D., Zhang H. Research on driving factors of forest ecological security: evidence from 12 provincial administrative regions in Western China. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. № 6:5505. <https://doi.org/10.3390/su15065505>.

Haapala H., Goltsova N., Seppälä R., Huttunen S., Kouki J., Lamppu J., Popovichev B. Ecological condition of forests around the eastern part of the Gulf of Finland. *Environmental Pollution*. 1996. Vol. 91. № 2. P. 253–265. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(95\)00034-8](https://doi.org/10.1016/0269-7491(95)00034-8).

Jenssen M., Nickel S., Schütze G., Schröder W. Reference states of forest ecosystem types and feasibility of biocenotic indication of ecological soil condition as part of ecosystem integrity and services assessment. *Environ Sci Eur*. 2021. Vol. 33. № 18. <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00458-2>.

Kassim A.R., Mismam M.A., Faidi M.A., Omar H. A tool for assessing ecological status of forest ecosystem. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 13–14 April 2016. № 37. 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/37/1/012026>.

Maes J., Bruzón A.G., Barredo J.I., Vallecillo S., Vogt P., Rivero I. M., Santos-Martín F. Accounting for forest condition in Europe based on an international statistical standard. *Nat Commun*. 2023. Vol. 14:3723. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39434-0>.

Morales-Barquero L., Skutsch M., Jardel-Peláez E.J., Ghilardi A., Kleinn C., Healey J.R. Operationalizing the definition of forest degradation for REDD+, with application to Mexico. *Forests*. 2014. Vol. 5. № 7. P. 1653–1681. <https://doi.org/10.3390/f5071653>.

Olofsson E., Jakobsson R. The potential to develop environmental values on privately owned forest land in southern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2023. Vol. 38. № 5. P. 300–315. <https://doi.org/10.1080/02827581.2023.2225871>.

Triviño M., Potterf M., Tijerin J., Ruiz-Benito P., Burgas D., Eyvindson K., Blattert C., Mönkkönen M., Duflo R. Enhancing resilience of boreal forests through management under global change: a Review. *Curr Landscape Ecol Rep*. 2023. Vol. 8. P. 103–118. <https://doi.org/10.1007/s40823-023-00088-9>.

References (translated & transliterated)

Valerko, R., Herasymchuk, L., Raduchych, A., & Ivanenko, R. (2023). Ekosystemni posluhy lisiv filii «Slovechanske lisove hospodarstvo» DP «Lisy Ukrainy» [Ecosystem services of the forests of the Slovechne Forestry branch of the State Enterprise «Forests of Ukraine»]. *Naukovyi visnyk Vinnytskoi akademii bezpererвної osvity. Seriya «Ekolohiia. Publichne upravlinnia ta administruvannia» [Scientific Bulletin of Vinnytsia Academy of Continuing Education. Series «Ecology. Public Administration»]*, 3, 71–76. <https://doi.org/10.32782/2786-5681-2023-3.09> [in Ukrainian].

Valerko, R.A., & Herasymchuk, L.O. (2017). Otsinka stanu lisovykh nasadzhenn v umovakh DP «Zarichnenske lisove hospodarstvo» yak pryrodnoho faktor stabilizatsii dovkillia [The assessment of the state of forest plantations in the «Zarichnenske forestry» public enterprise as a natural factor of the environment stabilization]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu [Bulletin of Kharkiv National Agrarian University]*, 1, 172–178 [in Ukrainian].

Herasymchuk, L., Medvedovskyi, Ye., & Valerko, R. (2023). Derzhavnyi nahliad (kontrol) u sferi okhorony, zakhystu, vykorystannia ta vidtvorennia lisiv na terytorii Zhytomyrskoi oblasti [State supervision (control) in the sphere of protection, protection, use and reproduction of forests in the territory of Zhytomyr region]. *Problemy khimii ta staloho rozvytku [Problems of Chemistry and Sustainable Development]*, 4, 38–47. <https://doi.org/10.32782/pcsd-2022-4-4> [in Ukrainian].

Herasymchuk, L., Valerko, R., & Litvin, A. (2023). Otsinka vplyvu na dovkillia pidpriemstv lisovoho hospodarstva [Environmental impact assessment of forestry enterprises]. New factors for the development of natural sciences in Ukraine and EU countries: Scientific monograph. Riga, Latvia: Baltija Publishing, P. 72–92. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-288-3-4> [in Ukrainian].

Melnyk-Shamrai, V.V., & Shamrai, V.I. (2022). Otsinka ekolohichnoho stanu osnovnykh nasadzhenn zony bezumovnoho vidseleennia u volohykh suborakh lisiv Ukrainiskoho Polissia [Assessment of the environmental state of pine plantations of the zone of unconditional settlement in wet subors of Ukrainian Polissia]. *Ekolohichni nauky [Ecological Sciences]*, 5 (44), 224–232. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.34> [in Ukrainian].

Selinyi, M.M., & Korma, O.M. (2019). Lisove hospodarstvo Ukrainy: suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku [Forestry of Ukraine: current state and development prospects]. *Modern Economics*, 17, 211–217. [https://doi.org/10.31521/modecon.V17\(2019\)-34](https://doi.org/10.31521/modecon.V17(2019)-34) [in Ukrainian].

Ahrends, A., Burgess, N.D., Milledge, S.A.H., Bulling, M.T., Fisher, B., Smart, J.C.R., Clarke, G.P., Mhoro, B.E., & Lewis, S.L. (2010). Predictable waves of sequential forest degradation and biodiversity loss spreading from an African city. *PNAS*, 107 (33), 14556–14561. <https://doi.org/10.1073/pnas.0914471107> [in English].

Altieri, S., Valor, T., & Battipaglia, G. (2023). Editorial: Forest adaptation to extreme environments and climate changes. *Front. Ecol. Evol*, 11 : 1230753. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1230753> [in English].

Geacu, S., Dumitraşcu, M., & Grigorescu, I. (2018). On the biogeographical significance of protected forest areas in southern Romania. *Sustainability*, 10 (7) : 2282. <https://doi.org/10.3390/su10072282> [in English].

FAO. 2020. Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9825en> [in English].

Golar, G., Muis, H., Akhbar, A., & Khaeruddin, C. (2022). Threat of forest degradation in Ex-Forest Concession Right (HPH) in Indonesia. *Sustainability and Climate Change*, 15 (1), 216–223. <https://doi.org/10.1089/scc.2022.0019> [in English].

Guo, K., Wang, B., & Niu, X.A. (2023). Review of research on forest ecosystem quality assessment and prediction methods. *Forests*, 14 (2), 317. <https://doi.org/10.3390/f14020317> [in English].

Guo, Y., Ma, X., Zhu, Y., Chen, D., & Zhang, H. (2023). Research on driving factors of forest ecological security: evidence from 12 provincial administrative regions in Western China. *Sustainability*, 15 (6), 5505. <https://doi.org/10.3390/su15065505> [in English].

Haapala, H., Goltsova, N., Seppälä, R., Huttunen, S., Kouki, J., Lamppu, J., & Popovichev, B. (1996). Ecological condition of forests around the eastern part of the Gulf of Finland. *Environmental Pollution*, 91 (2), 253-265. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(95\)00034-8](https://doi.org/10.1016/0269-7491(95)00034-8) [in English].

Jenssen, M., Nickel, S., Schütze, G., & Schröder, W. (2021). Reference states of forest ecosystem types and feasibility of biocenotic indication of ecological soil condition as part of ecosystem integrity and services assessment. *Environ Sci Eur*, 33 (18). <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00458-2> [in English].

Kassim, A.R., Misman, M.A., Faidi, M.A., & Omar, H. (2016). A tool for assessing ecological status of forest ecosystem. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 13–14 April, 37, 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/37/1/012026> [in English].

Maes, J., Bruzón, A.G., Barredo, J.I., Vallecillo, S., Vogt, P., Rivero, I.M., & Santos-Martín, F. (2023). Accounting for forest condition in Europe based on an international statistical standard. *Nat Commun*, 14, 3723. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39434-0> [in English].

Morales-Barquero, L., Skutsch, M., Jardel-Peláez, E.J., Ghilardi, A., Kleinn, C., & Healey, J.R. (2014). Operationalizing the definition of forest degradation for REDD+, with application to Mexico. *Forests*, 5 (7), 1653–1681. <https://doi.org/10.3390/f5071653> [in English].

Olofsson, E., & Jakobsson, R. (2023). The potential to develop environmental values on privately owned forest land in southern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 38 (5), 300–315. <https://doi.org/10.1080/02827581.2023.2225871> [in English].

Triviño, M., Potterf, M., Tijerín, J., Ruiz-Benito, P., Burgas, D., Eyvindson, K., Blattert, C., Mönkkönen, M., & Duflot, R. (2023). Enhancing resilience of boreal forests through management under global change: a Review. *Curr Landscape Ecol Rep*, 8, 103–118. <https://doi.org/10.1007/s40823-023-00088-9> [in English].

Отримано: 12.09.2023

Прийнято: 02.10.2023



УДК 574:57.04

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.14>

ОБ'ЄКТИ ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНОГО ФОНДУ: АНАЛІЗ НАСЛІДКІВ УКРАЇНСЬКО-РОСІЙСЬКОЇ ВІЙНИ

І. О. Удовенко¹, В. В. Мамчур², Ю. Ю. Сержантова³

Стаття є всеосяжним дослідженням, спрямованим на вивчення й оцінку впливу військової агресії на природно-заповідні території України. Українсько-російська війна призвела не тільки до людських жертв і руйнацій міст і сіл, але й до безпрецедентних наслідків для природних резерватів країни. Особливо це стосується об'єктів природно-заповідного фонду, які є важливими для збереження унікального природного спадку України. Території, які раніше служили заповідниками для різних видів рослин і тварин, тепер стали місцем воєнних дій. Знищені лісові масиви, забруднені водойми, змінені міграційні шляхи тварин – це лише декілька із численних наслідків війни для природи. Однак війна також показала, наскільки важлива роль наукової спільноти в аналізі та відновленні природних ресурсів. Дослідники й екологи спробували визначити масштаб збитків, а також розробити стратегії для їх подальшого відновлення. Мета статті полягає в дослідженні впливу україно-російського конфлікту на екологічний стан і функціонування природоохоронних територій України. Основна увага приділена виявленню ключових проблемних зон і формулюванню рекомендацій для їх реставрації та подальшої діяльності з метою забезпечення екологічної рівноваги. Використано дослідницький аналіз для збору й узагальнення даних про екологічний стан природно-заповідних об'єктів перед військовими діями та після них. Основний акцент буде зроблено на вивченні площ, біологічного розмаїття, стабільності екосистем, а також чисельності та різноманітності флори та фауни.

Використано геоінформаційний підхід для оцінки сучасних геоінформаційних систем для детального візуального аналізу та демонстрації динаміки змін у природних резерватах протягом конфлікту. Проведене Екологічне спостереження, як процес систематичного відстеження й аналізу змін у природних екосистемах, зокрема, звернення уваги на біологічне різноманіття та якість

¹ кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри геодезії, картографії і кадастру
(Уманський національний університет садівництва, м. Умань)
e-mail: irinaudovenko8@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5971-8365

² кандидат сільськогосподарських наук,
викладач кафедри лісового господарства
(Уманський національний університет садівництва, м. Умань)
e-mail: mamcurvalentina@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1579-4467

³ аспірант, старший викладач кафедри фізичної географії та картографії
(Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Харків)
e-mail: y.serzhantova@karazin.ua
ORCID: 0009-0004-9896-3768

екосистемних послуг, які надаються цими територіями. Доведено, що збереження та відновлення об'єктів природно-заповідного фонду – це питання не тільки екологічної безпеки, а й національної безпеки країни. Природні резервати можуть стати символами відновлення, миру та співіснування людини із природою після років конфлікту.

Ключові слова: природно-заповідний фонд України, військова агресія, знищення заповідного фонду, земельні ресурси, біосфера, техногенне забруднення, пошкодження природних ландшафтів.

OBJECTS OF THE NATURAL PRESERVATION FUND: ANALYSIS OF THE CONSEQUENCES OF THE UKRAINIAN-RUSSIAN WAR

I. O. Udovenko, V. V. Mamchur, Yu. Yu. Serzhantova

The article is a comprehensive study aimed at the study and assessment of the impact of military aggression on nature reserves of Ukraine. The Ukrainian-Russian conflict led not only to human casualties and the destruction of cities and villages, but also to unprecedented consequences for the country's natural reserves. This especially applies to the objects of the nature reserve fund, which are important for the preservation of the unique natural heritage of Ukraine. Territories that used to serve as sanctuaries for various species of plants and animals have now become the site of military operations. Destroyed forests, polluted reservoirs, changed migration routes of animals – these are just some of the many consequences of war for nature. However, the war also showed how important the role of the scientific community is in the analysis and restoration of natural resources. Researchers and ecologists tried to determine the extent of the damage, as well as to develop strategies for their further restoration. The purpose of the article is to study the impact of the Ukrainian-Russian conflict on the ecological state and functioning of nature conservation areas of Ukraine. The main attention is paid to the identification of key problem areas and the formulation of recommendations for their restoration and further activities in order to ensure ecological balance. Exploratory analysis was used to collect and generalize data on the ecological state of nature-reserved objects before and after military actions. The main emphasis will be on the study of areas, biological diversity, stability of ecosystems, as well as the number and variety of flora and fauna.

A geo-information approach was used to assess modern geo-information systems for detailed visual analysis and demonstration of the dynamics of changes in nature reserves during the conflict.

Conducted Ecological monitoring, as a process of systematic monitoring and analysis of changes in natural ecosystems, in particular, paying attention to biological diversity and the quality of ecosystem services provided by these territories. It has been proven that the preservation and restoration of the objects of the nature reserve fund is not only a matter of environmental security, but also of the country's national security. Nature reserves can become symbols of recovery, peace and coexistence of man and nature after years of conflict.

Key words: nature reserve fund of Ukraine, military aggression, destruction of protected background, land resources, biosphere, man-made pollution, damage to natural landscapes.

Вступ

Військове втручання Росії в Україні спричинило невідомі наслідки не тільки для населення, але й для природних резерватів у зоні конфлікту. Цілі лісові масиви були зруйновані. Великі ділянки заповідних територій залишилися замінованими, перетворюючись на зони підвищеної небезпеки. Довкілля зазнало удару від знищення рослинності та тваринного світу, випуску токсичних речовин, браконьєрства та нерегульованого рибальства. Багато працівників заповідних територій втратили змогу виконувати свої обов'язки та здійснювати наукові дослідницькі роботи. Проте ця

негативна ситуація надала цінний досвід у сфері захисту та використання природних резерватів під час воєнних дій і окупації. Центральною темою дослідження було визначення впливу війни на діяльність природоохоронних територій України. Аналіз і публікація цих даних сприятимуть підготовці природних заповідників до можливих непередбачених ситуацій як в Україні, так і в усьому світі.

Проблема створення та збереження територій і об'єктів природно-заповідного фонду на глибокому науковому рівні ще не була вивчена. Тему розвитку та діяльності природно-заповідного фонду висвіт-

лювали багато вчених у своїх працях (Присяжнюк, 2020; Смирнова та ін., 2020; Овчинникова, 2021). Існує значна кількість наукових робіт, присвячених моніторингу екологічного стану природно-заповідного фонду (Tsvyakh & Openko, 2017; Andryueyeva et al., 2019). У деяких публікаціях висвітлено проблеми втрати біорозмаїття та рішення для поліпшення екологічного статусу, зокрема через розширення заповідних зон (Wang & Dong, 2019; Роман, 2023). Проте аналіз учених вказує на брак інформації про екологічні ризики для спеціалізованих територій під час воєнних дій (Kolodezhna, 2022; Корчовий, 2023; Македон і Байлова, 2023), що стало причиною глибокого вивчення цього питання, яке розглядається у даній статті. Низка досліджень присвячено вивченню екологічних змін унаслідок воєнних дій на українських територіях. Огляд наукових праць вказує на те, що, незважаючи на наявність численних досліджень, окреслене питання потребує більш глибокого вивчення. Актуальність визначення ступеня впливу воєнних дій на природно-заповідний фонд (далі – ПЗФ) є ключовою для сучасної науки. Цей аспект зумовив вибір теми даної наукової роботи, її цілі та методу дослідження.

Матеріал і методи

1. Дескриптивний аналіз – систематизація інформації про стан об'єктів ПЗФ до та після війни. Перед початком аналізу важливо чітко визначити, які аспекти стану об'єктів ПЗФ планується дослідити. Це може включати площу, різноманіття видів, стан екосистем, кількість і типи рослин і тварин тощо:

– збір первинних даних: отримання інформації про об'єкти ПЗФ до початку війни за допомогою архівних документів, наукових публікацій, баз даних та інших наявних ресурсів;

– збір поточних даних: отримання актуальної інформації про стан об'єктів ПЗФ після війни за допомогою польових досліджень, спостережень, супутникових знімків та інших джерел;

– систематизація отриманої інформації: організація даних у логічному порядку, наприклад від найбільших до найменших об'єктів ПЗФ, або відповідно до рівня пошкодження;

– вивчення та порівняння: аналіз отриманих даних з метою виявлення змін у стані об'єктів ПЗФ до та після війни;

– візуалізація результатів: створення графіків, діаграм, таблиць або карт для наглядного представлення зібраної інформації.

2. Метод «Геоінформаційний аналіз» є важливим інструментом для вивчення та візуалізації змін на об'єктах природно-заповідного фонду:

– підготовка даних: збір просторових даних стосовно територій ПЗФ, які включають координати, межі територій, типи екосистем, історичні зображення тощо;

– імпорт даних: завантаження зібраних просторових даних у геоінформаційну систему для подальшого аналізу й обробки;

– просторовий аналіз: використання інструментів GIS для виявлення змін на територіях ПЗФ. Це може включати в себе порівняння історичних і актуальних зображень, визначення областей втрати рослинності або зміни в ландшафтах;

– візуалізація результатів: створення карт, що відображають зміни в розподілі й інтегритеті територій ПЗФ. Карті можуть показувати зони, найбільш постраждалі від впливу військових дій, зони, де відбувалося відновлення, та інші ключові характеристики.

3. Екологічний моніторинг – відстеження змін у біорізноманітті й екосистемних послугах на території ПЗФ:

– визначення базового стану: перед початком моніторингу необхідно визначити вихідний (базовий) стан біорізноманіття й екосистемних послуг на досліджуваній території. Це може включати збір даних про флору, фауну, якість ґрунтів, води тощо;

– установа станцій моніторингу: вибір місць для постійних або періодичних спостережень, щоб забезпечити репрезентативний зразок і консистентність збору даних;

– збір даних: регулярне проведення експедицій або використання автоматизованих засобів для збору даних про розмаїття видів, стан екосистем, кількість особин у популяціях та інші важливі параметри;

– аналіз отриманих даних: оцінка отриманих даних за допомогою статистичних методів для виявлення тенденцій або аномалій у стані біорізноманіття чи екосистемних послуг;

– виявлення загроз і змін: на основі зібраних даних визначаються зони, що потребують особливої уваги, а також відстежуються зміни, спричинені зовнішніми впливами, як-от воєнні дії.

Ці методи дозволять провести глибокий і всебічний аналіз наслідків війни для об'єктів природно-заповідного фонду України, визначити ключові проблеми та розробити рекомендації щодо їх вирішення.

Результати

Метою статті є вивчення та комплексний аналіз наслідків україно-російської війни для стану та функціонування об'єктів природно-заповідного фонду України, визначення основних зон ризику та розроблення рекомендацій щодо відновлення та забезпечення їх довгострокової стабільності.

Протягом майже двох років активних військових дій через російську агресію довкілля України зазнало збитків, які оцінюються більше ніж у 2 трлн грн. Натепер під контролем окупантів або в зоні військового конфлікту перебуває приблизно 500 тис. га території країни. У руках агресора залишаються численні об'єкти природно-заповідного фонду України, серед яких 10 національних парків, 8 заповідників і 2 біосферні резервати. Загрозі піддалися сотні видів рослин і тварин, зокрема види, що занесені до Червоної книги. Також потребує відновлення 2,4 млн га лісової зони. Частина природоохоронних зон, які перебувають під впливом конфлікту або окупації, сягає 44%. До цього числа входять до 900 областей, які стали зонами бойових дій або окуповані. Серед них є відомі природні заповідники (далі – ПЗ), як-от Асканія-Нова, Чорнобильський і Чорноморський біосферний заповідник – обидва є об'єктами світової спадщини ЮНЕСКО (Брайлян, 2023).

Натепер із 55 національних природних парків і природних заповідників України війною або окупацією були зачеплені 17. Також під їхній вплив потрапили 10 із 19 заповідників і 3 з 5 біосферних заповідників. Війна погрожує знищенням 14 об'єктів Рамсарської конвенції, майже 200 територій Смарагдової мережі та деяких біосферних заповідників. Загалом, війна має подібний негативний вплив на захищені та незахищені природні території, за винятком зон із власною адміністрацією, де забезпечення нормального функціонування стає особливо складним через військові дії (Омельчук і Софія, 2023).

Деякі національні природні парки зіткнулися з надзвичайною ситуацією. Азово-Чорноморська зона України служить домівкою для численних унікальних місць прибережжя, як-от лимани, озера, плавні, які є оселею для багатьох рідкісних видів.

Відсутність контролю та конфлікт у цій зоні погрожують знищенням цих природних заповідників і парків, які зазнали удару від війни. Працівники, що відповідають за охорону цих територій, часто не можуть ефективно виконувати свою роботу через військові дії. Зараз під контролем окупантів залишаються 8 природних заповідників і 10 національних природних парків, зокрема такі: «Великий Луг», «Приазовський», «Чарівна Гавань» та інші, розташовані в різних регіонах України. Унаслідок військових дій агресора значна частина природоохоронних територій України зазнала порушень. Прикладом цього є Опуцький природний заповідник у Криму, який було перетворено на військовий полігон. Отже, різноманітні природні ландшафти постраждали від вибухів, руху військової техніки й інших дій агресора. За даними Міністерства захисту довкілля України, конфлікт ускладнив роботу служб охорони природно-заповідних територій, що підсилює загрози для рідкісних видів. Велика частина Смарагдової мережі – мережі особливо важливих природоохоронних територій – також постраждала. Окрім того, у регіонах, які залишаються під контролем агресора, велика кількість лісових масивів стала недоступною. Збитки, завдані лісовому сектору, досі важко оцінити. Ці ліси також ховають у собі небезпеку у вигляді нерозірваних боеприпасів, що становитиме ризик протягом довгого часу. На додаток до інших порушень війська агресора використовують дерева для різноманітних потреб, зокрема для будівництва оборонних споруд і як паливо (Роман, 2023).

Використання важкої артилерії й авіації спричиняє пожежі та пошкодження рослинності. Тваринний світ перебуває під великою загрозою: пожежі, браконьєрство, шум від транспорту та бойових дій. Міграційні птахи, які намагаються гніздитися на Азово-Чорноморському узбережжі або Поліссі, можуть зіткнутися із проблемами через військові дії та пожежі. Багато видів, які мають пролітати Україну, можуть зазнати небезпеки, що може призвести до масового скорочення їхньої чисельності в європейському масштабі, зокрема й ті, що опинились під загрозою зникнення. У заповідниках і національних парках, які зараз перебувають під окупацією і де є велика кількість тварин (наприклад, заповідник «Асканія-Нова»), а також у зоопарках виникає серйозна небезпека для їхнього виживання. Основні

проблеми – це труднощі із закупівлею кормів і їх доставкою, а також відсутність належного ветеринарного обслуговування. Окрім того, будівництво оборонних споруд, детонації боеприпасів і рух танкової техніки на природоохоронних територіях призводять до знищення місцевих екосистем (Zamula & Shavurska, 2023). Ще однією проблемою є розливи паливно-мастильних речовин від пошкодженої техніки. Вони забруднюють не тільки суходіл, але й водойми – ріки та морські акваторії, куди також потрапляють аварійні літаки, гелікоптери та кораблі.

Війна приносить безліч ризиків для природи, які можна розділити на дві основні категорії: механічне пошкодження природних екосистем і втрату контролю держави над дотриманням екологічних норм у зоні конфлікту. Повне вивчення наслідків таких ризиків у найближчий час буде ускладненим через обмеження у проведенні натурних досліджень. Однак навіть на поточному етапі можна визначити основні напрями майбутніх досліджень і стратегії відновлення пошкоджених територій (рис. 1).

Військова активність збільшує загрозу для дикої фауни. Тварини, що потрапляють під вплив бойових дій, часто гинуть або змушені шукати нові території. Це особливо небезпечно для птахів, які готуються до розмноження. Лосі, внесені до Червоної книги України, також стикаються з викликами через військову активність під час свого розмноження. Три ключові міграційні маршрути для птахів проходять через Україну.

Вони служать відпочинковими зонами для численних видів птахів, зокрема для гусей, качок, лебедів, журавлів та інших. Ці маршрути є важливими для птахів для харчування та відновлення сил. На жаль, багато із цих коридорів зараз опинились у районі військових конфліктів, що ставить птахів під загрозу. Зміни в міграційних маршрутах, потреба обходити небезпечні зони та загроза опинитися під обстрілом можуть призвести до виснаження птахів і, у кінцевому підсумку, до зниження їхньої чисельності (Природно-заповідний ..., 2022).

Весняний пожежонебезпечний період збільшує ризик загорянь в екосистемах через бойові дії. Особливо небезпечною є суха минулорічна трава, яка може легко загорятися. У сухій погоді такі пожежі поширюються дуже швидко, покриваючи великі площі.

На окупованих територіях пожежні служби не можуть проводити свою роботу, що робить ліквідацію пожеж майже неможливою. Особливу увагу варто приділити монокультурним сосновим насадженням на півночі та сході України, які є особливо схильними до пожеж. На півночі України, де спостерігаються бойові дії, також розташовані значущі болотні території та торф'яники. Більшість українських торфовищ осушена, що створює умови для виникнення небезпечних торф'яних пожеж. Ці пожежі важко ліквідувати. Продовження військової

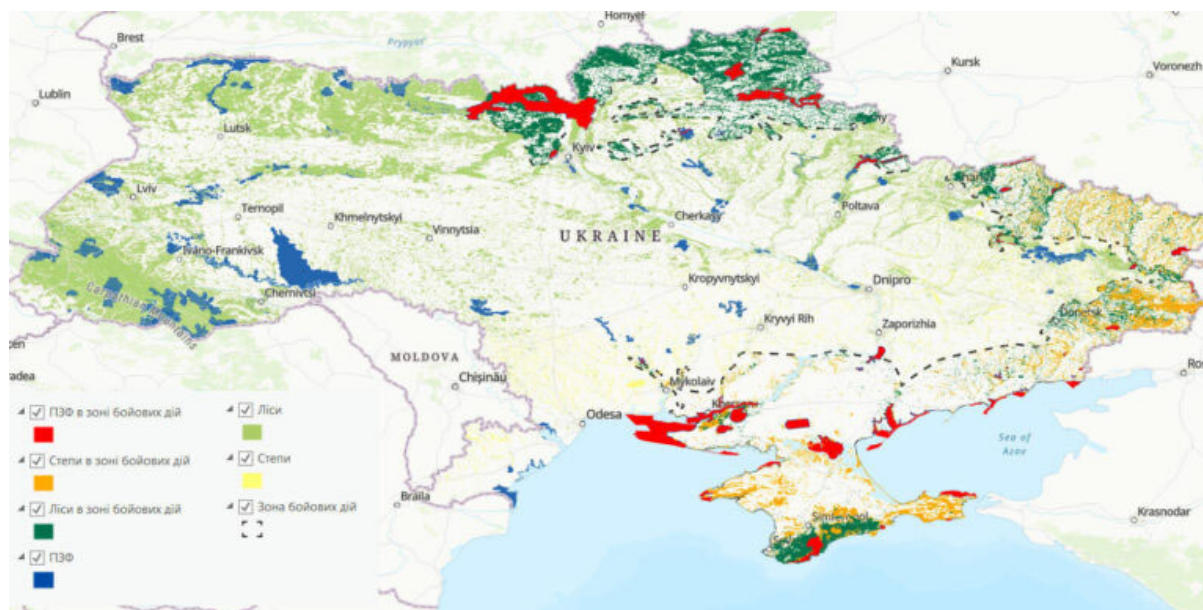


Рис. 1. Візуальний звіт щодо пошкоджень природних і заповідних зон через військове вторгнення Росії (Міністерство захисту довкілля і природних ресурсів України, 2023)

активності в цих регіонах може мати серйозні наслідки для екології та здоров'я населення. Під час горіння торфовищ в атмосфері викидаються токсичні сполуки, як-от діоксид вуглецю, тонкий пил та інші хімікати. Деякі супутникові спостереження вже зафіксували невеликі пожежі на природних об'єктах, зокрема й на території навколо Чорнобилю (рис. 2).

Проведемо дослідження впливу різних чинників військової агресії на ПЗФ України:

1. Хімічні наслідки від ракетних обстрілів. Протягом перших 20 днів військової агресії Росії на українську територію було випущено приблизно 900 ракет різного класу. Мішенями стали як цивільні, так і військові об'єкти, включаючи аеропорти, місця зберігання боєприпасів і навіть населені місця. Детонація ракет і снарядів призводить до утворення численних хімічних сполук: від загальновідомих, як-от CO_2 та H_2O , до отруйних, як-от формальдегід і ціаніста кислота. Ці сполуки впливають на ґрунт, рослинність і споруди. Більшість виділених під час вибуху речовин окислюється, а їхні реактивні продукти потрапляють у повітря. Хоча сполуки CO_2 та H_2O самі собою не є токсичними, вони спричиняють парниковий ефект і внесення змін у клімат. Інші сполуки, як-от оксиди сірки й азоту, можуть спричинити кислотні дощі, які пошкоджують рослинність, змінюють характеристики ґрунту та негативно впливають на здоров'я людей і тварин (Homanuk et al., 2023).

Уламки боєприпасів, що залишаються у природі, вносять додаткове наванта-

ження на екосистему. Чавун, із якого часто виготовляють оболонки снарядів, містить не лише залізо та вуглець, а й інші елементи, як-от сірка та мідь. Ці елементи можуть потрапляти у ґрунт, а згодом – і у ґрунтові води, впливати на екосистему та здоров'я живих організмів. Окрім цього, знищена військова техніка, зокрема згорілі танки, автомобілі й авіаційна техніка, є джерелами потенційного забруднення. До пізньої осені 2022 р. приблизно 2,4 млн гектарів території було зачеплено пожежами, з них 330 тис. га лісової зони. У результаті, численні лісові ділянки у таких ПЗ, як «Кремінські ліси», «Святі гори», «Білобережжя Святослава» та Чорнобильський біосферний заповідник, були пошкоджені (рис. 3).

2. Значні природні резервати стали жертвами пожеж через військові дії. Під час конфлікту пожежі на природних територіях збільшилися у 45 разів порівняно з попередніми роками. У 2022 р. Кінбурнська коса в Чорному морі потерпала від великого вогню. Через окупований статус та мінування території було неможливо швидко припинити горіння. Вогонь загрожував багатьом гніздовим територіям птахів і значущим полям орхідей. За попередніми даними, приблизно 130 гектарів зазнали пошкоджень, включаючи руйнацію рідкісних видів тварин і флори регіону. Бойові дії, як-от обстріли ракетами, детонації мін та інших вибухових речовин, призвели до приблизно 600 пожеж, захопивши понад 13 тисяч гектарів. Екосистеми також зазнали збитків від спалення нафтопродуктів.

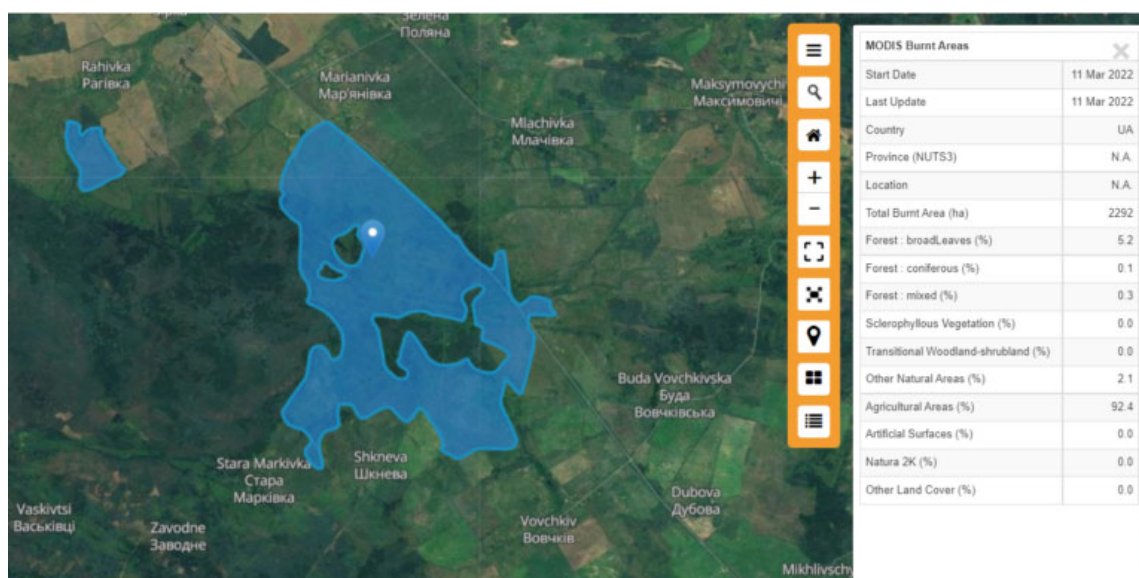


Рис. 2. Зафіксовані зони пожеж через військові дії на території Чорнобильської зони та Чорнобильського заповідника (Vasyliuk, 2022)



Рис. 3. Зафіксовані локації лісових пожеж на території Кінбурнської коси восени 2022 р. (Корчовий, 2023)

Шкідливі хімічні речовини після потрапляння у ґрунт дестабілізують його структуру. Міни та вибухи також спричиняють загибель багатьох диких тварин. Є стійка загроза появи нових пожеж унаслідок військових дій. Суха рослинність швидко запалюється, а пожежі стрімко поширюються. В окупованих районах важко здійснити протипожежні заходи. Місця з густими сосновими насадженнями на півночі та сході країни, а також в Чорнобильській зоні, є особливо сприятливими для поширення вогню. Пожежі завдають шкоди екосистемам, причому негативні наслідки мають спільні особливості: величезна кількість рослин і тварин гине, атмосфера зазнає забруднення у вигляді різних шкідливих сполук і викидів CO_2 (Shvedun et al., 2023).

Проте необхідно враховувати, що ступінь ушкоджень і час, необхідний для відновлення, суттєво різняться залежно від типу екосистеми та характеру пожежі. Наприклад, старий дубовий чи сосновий ліс після руйнівної пожежі може потребувати для відновлення понад століття, відповідно до віку старіших дерев, які загинули. У разі менш інтенсивних пожеж основні дерева мають шанси вижити, а процес відновлення буде коротший, від декількох років до декількох десятків років. Для степів відновлювальний період коротший, але час року, коли відбулась пожежа, відіграє ключову роль. Якщо

пожежа відбулась в пізній осені або взимку, коли рослинність не активна, наслідки зазвичай не будуть такими катастрофічними, оскільки коренева система степових рослин адаптована до подібних умов і залишиться непошкодженою (Scholtens, 2017).

Під час вегетаційного періоду пожежі можуть завдати непоправної шкоди флорі та фауні, особливо у степових регіонах. Наприклад, весняні пожежі можуть на тривалий час знищити деякі види рослин, багато з яких є занесеними до Червоної книги України або місцевих списків рідкісних видів, і це погіршує перспективи їх збереження. Хоча водно-болотні території зазвичай мають досить води для того, щоб уникнути пожежі, у сухі періоди вони також можуть стати легкою здобиччю вогню, особливо коли знижується рівень води на болотах. Торфові пожежі на таких територіях можуть тривати довгий час, вивільняти водночас шкідливі речовини.

3. Ще одним джерелом шкоди для природних територій є вибухи боєприпасів і руйнування військової техніки. Вони призводять до забруднення ґрунтів, водойм і підземних вод токсичними речовинами. Ідеться про залишки вибухівок, петролеумові продукти, важкі метали й інші шкідливі речовини. На особливу увагу заслуговує ракетне паливо старого виготовлення, яке активно використовують ворожі війська (рис. 4).



Рис. 4. Приклади взаємодії військових впливів, спричинених руйнівними діями боєприпасів і наслідками забруднення техніки, палинками та вибуховими речовинами на території ПЗ України (Kolodezhna et al., 2022)

Коли зазначені шкідливі речовини потрапляють у землю та підземні води, вони можуть рухатися далі до річок і озер, накопичуватись у тілах живих істот і становити загрозу для їхнього здоров'я або навіть життя. Водні організми, особливо ті, які проводять багато часу у водоймах, є найбільш уразливими до цього забруднення, як-от різноманітні риби або водоплавні птахи. Біологічне накопичення отруйних речовин відбувається через процес біомагніфікації, коли з кожним наступним рівнем у харчовому ланцюзі концентрація отруйних речовин стає вищою. Це може призвести до того, що види на верхівці харчової піраміди, як-от хижаки або навіть людина, стануть найбільш уразливими до цих забруднювачів.

Взаємодія вибухів боєприпасів і природи не обмежується лише фізичним руйнуванням. Постійний шум, створений вибухами, приносить стрес тваринам, спонукає їх відходити від місць конфлікту. Це може призвести до втрати житлових місць, ресурсів харчування та зміни міграційних маршрутів. Ця проблема актуальна для мігруючих птахів, зокрема для тих, які пересуваються ключовими маршрутами в Україні. Після вторгнення декілька важливих міграційних маршрутів зазнали руйнувань (Kucher et al., 2023).

Лісові екосистеми також відчувають вплив забруднення ділянок вибухонебезпечними об'єктами, як-от міни та невзбухові боєприпаси. Ці лісові ділянки можуть

бути недоступними для використання довгий час, оскільки їх розмінування є величезним викликом. Такі загрози є найбільш актуальними для крупних диких тварин, які можуть активувати вибухонебезпечні предмети. З іншого боку, обмежений доступ до ділянок може мати користь для деяких видів, оскільки це знижує антропогенне втручання. Проте в довгостроковій перспективі поширені пожежі, спричинені вибухами, становлять загрозу для більшості екосистем.

Коли ЗСУ звільнили низку регіонів, зокрема Київщину, Сумщину та Чернігівщину, це дозволило повернути під український контроль декілька природно-заповідних територій. Наприклад, Дворічанський національний природний парк, розташований у Харківській області, славиться своїми крейдяними пагорбами. Протягом вересня, коли наші військові виводили ворога, парк було звільнено. Інший приклад – ПЗ «Святі Гори», розташований у Донецькій області. З початку війни парк зазнав значних втрат, зокрема й жертв серед персоналу та матеріальних збитків. Проте, незважаючи на всі виклики, команда парку не тільки повертається на свої позиції, але й активно допомагає місцевій спільноті. Нині парк фокусується на відновленні та підтримці місцевої громади, організовує розмінування та надає допомогу в управлінні територією в умовах відсутності місцевої влади. Це стало свідченням того, що незважаючи на всі виклики,

держава продовжує бути поруч із своїми громадянами (Ніколайчук, 2022).

Після звільнення території ПЗ «Кам'янська Січ» українськими силами ми отримали змогу оцінити наслідки окупації. Цей природний резерват розташований на понад 12 тисячах гектарів Південного Степу, який включає в себе частину Дніпра, акваторію Каховського водосховища й інші унікальні природні об'єкти. Незважаючи на звільнення, ворожі сили з лівобережжя продовжують обстрілювати резерват. За час окупації територія НЗ зазнала значних збитків. Супутниковий моніторинг показав, що було знищено понад 600 гектарів цінних ділянок. Тут росли рідкісні види рослин, велика кількість яких загинула через пожежі. Також постраждала інфраструктура парку: багато майна було викрадено, а деякі споруди – знищено. Зараз основний напрям роботи персоналу НЗ – це розмінування території. Це важливий етап перед відновленням природних ресурсів. Парк «Кам'янська Січ» є особливим місцем з унікальною флорою та фауною, попри всі труднощі, працівники докладають зусиль, щоб зберегти та відновити його природне багатство (Ангурець та ін., 2023).

Натепер прикордонна зона між Україною та сусідніми державами Росією та Білоруссю є особливим місцем з екологічного погляду. Більш ніж 120 000 гектарів цієї зони належать до природно-заповідного фонду України. Важливо відзначити, що саме тут розташовані найбільше об'єктів Смарагдової мережі – міжнародних природоохоронних територій, визнаних Радою

Європи. З боку Білорусі подібні природоохоронні зони також зосереджені біля кордону. Це не просто так, адже ця прикордонна територія становить основну частину Поліського регіону біля річки Прип'ять, який впливає на кліматичні умови в Центральній Європі. Ці місця є справжніми перлинами природи, де збереглися недоторкані екосистеми. Особливість України полягає у створенні природоохоронних зон за допомогою строгого обмеження людської активності. Найбільш яскравий приклад – це зона відчуження навколо Чорнобильської АЕС. Протягом останніх трьох десятиліть територія старих колгоспів і зниклих населених пунктів перетворилася на величезний природний резерват, який тепер є біосферним заповідником (Ishchuk et al., 2018). Він є найбільшим природоохоронним об'єктом серед інших, розташованих уздовж кордону України (рис. 5).

Природні об'єкти, як-от ліси та болота у прикордонних районах, можуть слугувати потенційними щитами проти агресії, якщо їх належно охороняти та доглядати. Хоча 174,4 тисячі гектарів цієї смуги не входять у природно-заповідний фонд, їх можна було б додати до вже існуючих 120 тисяч гектарів охоронних зон. Збереження природних ландшафтів і боліт у Поліссі, які вже довели свою ефективність, коли російська військова техніка загрузла в болотах у 2022 р., може бути ключем до підвищення обороноздатності (Глухонець та ін., 2022). Обводнені та незруйновані природні території можуть відігравати вирішальну роль у захисті від потенційних загроз. І хоча ідея обводнення



Рис. 5. Карта природних заповідних територій, розташованих уздовж українського кордону

Позначення: сірим кольором відзначено державний кордон (верхній ряд – Білорусь, нижній – Україна); зеленим вказано заповідні території, що охороняються; рожевим і помаранчевим – інші ділянки

боліт і перетворення їх на заповідник ще не отримала широкого розголосу, такий підхід має великий потенціал (рис. 6).

Охорона природних заповідників як невід'ємна частина культурної спадщини України відображається в законодавстві країни. До 2022 р. не було дискусій стосовно можливості співіснування прикордонної смуги та заповідних територій. Однак тепер це питання стало актуальним для законодавчого регулювання. Загальна пропонувана довжина прикордонної смуги з Білоруссю охоплює приблизно 65 тисяч га заповідних земель, тоді як з Росією – ще 56 тисяч га. Усього вздовж кордону із країнами, що виступають в ролі агресорів, розташовано приблизно 90 об'єктів заповідного статусу різних категорій (Мокрий, 2023).

Після завершення війни нас очікує наслідок бойових дій: порушення екосистем, забруднені ґрунти, скорочення біорізноманіття та збільшення чисельності шкідників у лісових масивах. Також для відновлення нашої країни буде потрібна значна кількість природних ресурсів. Є й інша проблема: війна може завадити дотриманню Україною кліматичних зобов'язань, адже процес відбудови призведе до великих викидів парникових газів. Через очікуване хімічне забруд-

нення необхідно встановити ефективну систему контролю довкілля після завершення бойових дій. Така система допоможе визначити розмір завданої шкоди, розробити заходи для її усунення.

Обговорення

Військові конфлікти на сході України принесли низку викликів для НЗФ: від безпосереднього знищення природних об'єктів до втручання у природні екосистемні процеси. Натепер складно повноцінно виміряти обсяг цих збитків, ідентифікувати всі пошкоджені території та розробити стратегію для невідкладного реагування. Важливо негайно визначити й оцінити екологічні ризики, спричинені військовими діями, поінформувати суспільство про можливі наслідки та підготувати комплексний план відновлення. У контексті реконструкції країни після війни споживання природних ресурсів значно зросте. Військові операції та відбудовні заходи можуть призвести до збільшення викидів парникових газів, що ускладнить виконання Україною її кліматичних зобов'язань. Беручи до уваги можливий негативний вплив на довкілля, потрібно розробити систему екологічного моніторингу, щоби оцінити збитки та визначити план їх усунення для забезпечення добро-

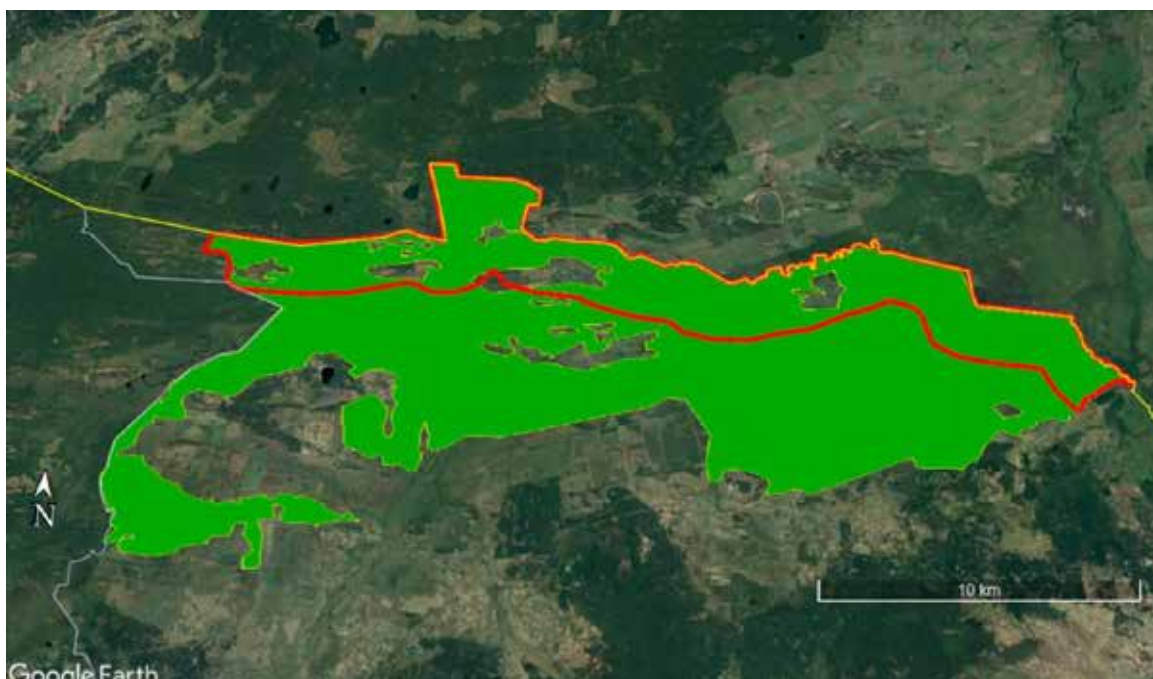


Рис. 6. Національний природний парк «Нобельський» і прилегла прикордонна зона (Толкаченко, 2022).

Позначення: жовтим кольором підкреслено державний кордон (Білорусь зверху й Україна внизу), зеленим вказано територію парку, а червоним позначено прикордонну зону, яка розташована в межах парку

буту людей і природи (Makedon et al., 2023). Водночас варто зосередити увагу на екологічному підході до відновлення й адаптації до зміни клімату у процесі реконструкції країни. Надалі увагу варто зосередити на моніторингу стану екосистем НЗ, завданням якого буде розроблення методик моніторингу довкілля в умовах військових дій, включаючи систему експрес-тестування, яка підтримується акредитованими лабораторіями. Окрім того, важливо зібрати дані про види та модифікації ракет, які Росія використовувала на території України, а також про їхні траєкторії. Це потрібно для оцінки впливу викидів, які виникають під час вибухів і спалювання ракет, і допоможе розробити технічні заходи з відновлення об'єктів НЗФ України. Рекомендуємо встановити партнерство з NASA та Махаг для аналізу впливу військових дій на об'єкти НЗФ України.

Основною метою є збереження та відновлення сільськогосподарських земель, які постраждали від забруднень війною чи неправильного господарювання. Це може досягатися шляхом відновлення природних рослинних зон, що відповідають місцевому клімату та ґрунтам. Надалі такі регеновані території можуть стати частиною природоохоронних зон України. Фінансування таких проєктів буде викликом, особливо в умовах конфлікту, але в довгостроковій перспективі репарації від Росії можуть стати важливим джерелом коштів для екологічних ініціатив. Існуючі екофонди, які накопичуються від екологічних податків, можуть бути іншим джерелом фінансування. Важливо перес-

прямувати ці кошти на ефективні екологічні заходи. З такими ресурсами Україна може робити екосистемне відновлення пріоритетом у державній агенді, якщо буде наявна політична воля на найвищому рівні.

Висновки

Ми спостерігаємо, що військове втручання Росії призвело до низки негативних змін у природоохоронних і заповідних об'єктах України. Основна проблема – це екологічні наслідки. Бойові дії спричинили збиток екосистемам, вирубування лісів, знищення рослинності, забруднення природи, масштабні пожежі, скорочення числа тварин та зміну міграційних маршрутів птахів, які колись пролягали через українські природні резервати. Під окупаційним контролем також підвищилась активність браконьєрів і недобросовісних фермерів. До того ж багато природоохоронних територій було заміновано, що зробило їх небезпечними для людей. Це призвело до трагічних інцидентів, коли навіть незначний відхід з основних шляхів може стати фатальним. Відвідування таких місць або наукові дослідження стали майже неможливими. Останнім, але не менш важливим, є вплив на працівників природних заповідників України. Вони стикалися з багатьма викликами: небезпекою для життя в зоні конфлікту, втратою дому та майна, пресингом в окупованих територіях, фінансовою нестабільністю та психологічними травмами. Вирішення цих проблем повинно бути зорієнтовано на гарантування безпеки, відновлення довкілля та розширення міжнародного співробітництва.

Список використаної літератури

Ангурець О., Хазан П., Колесникова К., Куш М., Чернохова М., Гавранек М. Наслідки для довкілля війни росії проти України. 2023 [Електронний ресурс]. URL: <https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/cleanair.org.ua-war-damages-ua-version-04-low-res.pdf> (дата звернення 20.09.23).

Брайлян Є. 20% природно-заповідного фонду України постраждало від війни. [Електронний ресурс]. URL: <https://armyinform.com.ua/2023/04/17/20-prirodno-zapovidno-fondu-ukrainy-postrazhdalo-vid-vijny/> (дата звернення 20.09.23).

Глухонець А.О., Морозова Т.В., Морозов А.В., Кобзиста О.П., Самойленко І.В., Стецюк А.М. Використання ГІС технологій для модернізації систем моніторингу об'єктів природно-заповідного фонду України. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. 2022. № 2(98). С. 40-54.

Корчовий Р. Спеціальний адміністративно-територіальний режим територій природно-заповідного фонду: чинники самоврядного механізму управління. *Теоретичні та прикладні питання державотворення*. 2023. Вип. 28. С. 67–82. <https://doi.org/10.35432/tisb282022285247>

Македон В.В., Байлова О.О. Планування і організація впровадження цифрових технологій в діяльність промислових підприємств. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки»*. 2023. Випуск 47. С. 16–26. <https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3>.

Матеріали Робочої групи з питань природно-заповідного фонду. Випуск 1. / Ред.: Ю.Ю. Овчинникова. Київ : Комітет Верховної Ради України з питань екологічної політики та природокористування. 2021. 132 с.

Мокрий В. Вплив російської агресії на природоохоронні території України [Електронний ресурс]. URL: <https://svitua.org/2023/01/17/vplyv-rosijskoji-agresiyi-na-prirodooohoronni-terytoriyi-ukrayiny/> (дата звернення 20.09.23)

Ніколайчук Т. Факторинг у сфері природно-заповідного фонду України, як інструмент розвитку соціально відповідального бізнесу. *Innovation and Sustainability*. 2022. № (1). С. 72–83. <https://doi.org/10.31649/ins.2022.1.72.83>.

Омельчук О., Софія С. Природа та війна: як військове вторгнення Росії впливає на довкілля України [Електронний ресурс]. URL: <https://ecoaction.org.ua/pryroda-ta-vijna.html> (дата звернення 20.09.23).

Офіційний сайт Природно-заповідного фонду Міністерства захисту довкілля і природних ресурсів України [Електронний ресурс]. URL: <https://wownature.in.ua>. (дата звернення 20.09.23).

Природно-заповідний фонд України в умовах війни. 2022 [Електронний ресурс]. URL: <https://nenc.gov.ua/?p=42530> (дата звернення 20.09.23).

Присяжнюк П. Розширення природно-заповідного фонду Херсонщини: проблеми та перспективи. *Таврійський науковий вісник. Серія: Економіка*. 2020. №(4). С. 148–154. <https://doi.org/10.32851/2708-0366/2020.4.18>.

Роман Л.Ю. Аналіз екологічних загроз об'єктів ПЗФ України у воєнний період. *Екологічні науки*. 2023. № 3(42). С. 84–88. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.3-42.13>

Смирнова С.М., Смирнов В.М., Островерха В.О. Наукові засади управління розвитком природно-заповідних територій. *Агроекономіка*. 2020. № 2. С. 77–83.

Толкаченко О.В. Визначення понять «біосферний заповідник» і «біосферний резерват» за законодавством України. *Правова держава*. 2022. №45. С. 41–48. <https://doi.org/10.18524/2411-2054.2022.45.254365>.

Andryeyeva N., Khumarova N., Nikolaychuk T. Aligning the social, environmental, and economic interests of “green growth” of the Ukrainian nature reserve fund objects. *Environmental Economics*. 2019. № 10(1). P. 93–104. [https://doi.org/10.21511/ee.10\(1\).2019.07](https://doi.org/10.21511/ee.10(1).2019.07).

Homanyuk M., Khodosovtsev O., Moysiyenko I., Ponomaryova O., Zharonkin V. Ukrainian facilities of the nature reserve fund in the conditions of war and Russian occupation. *Економічна та соціальна географія*. 2023. № 89. с. 31–41. <https://doi.org/10.17721/2413-7154/2023.89.31-41>.

Ishchuk L.P., Kurka S.S., Ishchuk G.P. From the experience of training specialists of forestry and landscape gardening. Professional competency of modern specialist: means of formation, development and improvement: monograph. Warsaw: BMT Eridia Sp .z o.o., 2018. P. 285–302.

Kolodezhna V. Vasyliuk O. Spinova Yu. Simonov E. Ukraine War Environmental Consequences. *Journal UWEC*. 2022. issue № 6. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35785.42084>.

Kucher A., Honcharova A., Kucher L., Bieloborodova M., Bondarenko L. Impact of War on the Natural Preserve Fund: Challenges for the Development of Ecological Tourism and Environmental Protection. *Journal of Environmental Management and Tourism*. 2023. 14. P. 2414. [https://doi.org/10.14505/jemt.v14.5\(69\).23](https://doi.org/10.14505/jemt.v14.5(69).23).

Makedon V., Mykhailenko O., Dzyad O. Modification of Value Management of International Corporate Structures in the Digital Economy. *European Journal of Management Issues*. 2023. 31(1). pp. 50–62. <https://doi.org/10.15421/192305>.

Scholtens B. Why Finance Should Care about Ecology. *Trends in Ecology and Evolution*. 2017. Vol. 32. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2017.03.013>.

Shvedun V., et al. Evaluation of environmental security of Ukraine during the russian invasion: state, challenges, prospects. *Journal of Environmental Management and Tourism*. 2023. № 14(3). pp. 787–798. [https://doi.org/10.14505/jemt.14.3\(67\).18](https://doi.org/10.14505/jemt.14.3(67).18).

Tsvyakh O., Openko I. Main directions of urban land optimization in Kiev agglomeration. *Baltic Surveying International Scientific Journal*. 2017. Vol. 61. pp. 60–65.

Vasyliuk O. Impact of the war on the objects of the nature reserve fund. Ukrainian Nature Conservation Group. [Electronic resource] URL: <http://surl.li/mnmgk> (access date 20.09.23).

Wang C., Dong G. Research on Green Financial Ecology Construction Based on Low Carbon Economy. *Ekoloji*. 2019. № 107. P. 3635–3641. [Electronic resource] URL: <http://www>.

ekolojidergisi.com/article/research-on-green-financial-ecology-construction-based-on-low-carbon-economy-6006. (access date 20.09.23).

Zamula I., Shavurska O. Strategic directions for restoration of environmental security of the Polissia region in the post-war period. *Journal of Innovations and Sustainability*. 2023. № 7(1). pp. 02. <https://doi.org/10.51599/is.2023.07.01.02>.

References (translated & transliterated)

Angurets, O., Khazan, P., Kolesnikova, K., Kush, M., Chernokhova, M., & Havranek, M. (2023). Naslidky dlya dovkillya viyny rosiyi proty Ukrainy [Consequences for the environment of Russia's war against Ukraine]. [Electronic resource] URL: <https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/cleanair.org.ua-war-damages-ua-version-04-low-res.pdf> (access date 20.09.23) [in Ukrainian].

Braylyan, E. (2023). 20% pryrodno-zapovidnoho fondu Ukrainy postrazhdalo vid viyny [20% of the natural reserve fund of Ukraine was affected by the war]. [Electronic resource] URL: <https://armyinform.com.ua/2023/04/17/20-pryrodno-zapovidnogo-fondu-ukrainy-postrazhdalo-vid-viyny/> (access date 20.09.23) [in Ukrainian].

Hlukhonets, A.O., Morozova, T.V., Morozov, A.V., Kobzyska, O.P., Samoilenko, I.V., & Stetsiuk, L.M. (2022). Vykorystannya his tekhnolohiy dlya modernizatsiyi system monitorynhu ob'yektiv pryrodno-zapovidnoho fondu Ukrainy [Use of gis technologies for modernization of monitoring systems of objects of the nature and preserve fund of Ukraine]. *Visnyk Natsional'noho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannya [Bulletin of the National University of Water Management and Nature Management]*, 2(98), 40–54 [in Ukrainian].

Korchovy, R. (2023). Spetsial'nyy administratyvno-terytorial'nyy rezhym terytoriy pryrodno-zapovidnoho fondu: chynnyky samovryadnoho mekhanizmu upravlinnya. [Special administrative-territorial regime of the territories of the nature reserve fund: factors of the self-governing management mechanism]. *Teoretychni ta prykladni pytannya derzhavotvorenn [Theoretical and applied issues of state formation]*, 28, 67–82. <https://doi.org/10.35432/tisb282022285247> [in Ukrainian].

Makedon, V.V., & Bailova, O.O. (2023). Planuvannya i orhanizatsiya vprovadzhennya tsyfrovyykh tekhnolohiy v diyal'nist' promyslovykh pidpryyemstv [Planning and organizing the implementation of digital technologies in the activities of industrial enterprises]. *Naukovyy visnyk Khersonskoho derzhavnoho universytetu. Seriya «Ekonomichni nauky» [Scientific Bulletin of Kherson State University. Series «Economic Science»]*, 47, 16–26. <https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3> [in Ukrainian].

Ovchinnikov, Yu.Yu. (2021). Materialy Robochoyi hrupy z pytan' pryrodno-zapovidnoho fondu [Materials of the Working Group on Nature Reserve Fund]. Issue 1, Kyiv: Committee of the Verkhovna Rada of Ukraine on Environmental Policy and Nature Management, 132 [in Ukrainian].

Mokryi, V. (2023). Vplyv rosiys'koyi ahresiyi na pryrodookhoronni terytoriyi Ukrainy [The impact of Russian aggression on nature conservation areas of Ukraine]. [Electronic resource] URL: <https://svitua.org/2023/01/17/vplyv-rosijskoyi-agresiyi-na-pryrodookhoronni-terytoriyi-ukrainy/> (access date 20.09.23) [in Ukrainian].

Nikolaychuk, T. (2022). Faktorynh u sferi pryrodno-zapovidnoho fondu Ukrainy, yak instrument rozvytku sotsial'no vidpovidal'noho biznesu [Factoring in the nature reserve fund of Ukraine as a tool for the development of socially responsible business]. *Innovation and Sustainability*, (1), 72–83. <https://doi.org/10.31649/ins.2022.1.72.83> [in English].

Omelchuk, O., & Sofia, S. (2023). Pryroda ta viyna: yak viys'kove vtorhnennya Rosiyi vplyvaye na dovkillya Ukrainy [Nature and War: How Russia's Military Invasion Affects Ukraine's Environment]. [Electronic resource] URL: <https://ecoaction.org.ua/pryroda-ta-vijna.html> (access date 20.09.23) [in Ukrainian].

Ofitsiyyny sayt Pryrodno-zapovidnoho fondu Ministerstva zakhystu dovkillya i pryrodnykh resursiv Ukrainy [Official website of the Nature Reserve Fund of the Ministry of Environment Protection and Natural Resources of Ukraine]. [Electronic resource] URL: <https://wownature.in.ua> (access date 20.09.23) [in Ukrainian].

Pryrodno-zapovidnyy fond Ukrainy v umovakh viyny [Nature reserve fund of Ukraine in war conditions] (2022). [Electronic resource] URL: <https://nenc.gov.ua/?p=42530> (access date 20.09.23) [in Ukrainian].

Prisyajnyuk, P. (2020). Rozshyrennya pryrodno-zapovidnoho fondu Khersonshchyny: problemy ta perspektyvy [Expansion of kerson region nature reserve fund: problems and prospects]. *Tavriys'kyj*

naukovyj visnyk. Seriya: Ekonomika. [Taurida Scientific Herald. Series: Economics], (4), 148–154. <https://doi.org/10.32851/2708-0366/2020.4.18> [in English].

Roman, L.Yu. (2023). Analiz ekolohichnykh zahroz ob"yektiv PZF Ukrayiny u voyennyi period [Analysis of ecological threats of the PZF objects of Ukraine during the war period]. *Ekolohichni nauky [Environmental sciences]*, 3(42), 84–88. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.3-42.13> [in Ukrainian].

Smyrnova, S.M., Smirnov, V.M., & Ostroverkha, V.O. (2020). Naukovi zasady upravlinnya rozvytkom pryrodno-zapovidnykh terytoriy [Scientific principles of managing the development of nature-protected territories]. *Agrosvit [Agroworld]*, 2, 77–83 [in Ukrainian].

Tolkachenko, O.V. (2022). Vyznachennya ponyat' «biosfernnyy zapovidnyk» i «biosfernnyy rezervat» za zakonodavstvom Ukrayiny [Definition of the terms «biosphere reserve» and «biosphere reserve» under the legislation of Ukraine]. *Pravovyi svit [Constitutional state]*, 45, 41–48. <https://doi.org/10.18524/2411-2054.2022.45.254365> [in Ukrainian].

Andryeyeva, N., Khumarova, N., & Nikolaychuk, T. (2019). Aligning the social, environmental, and economic interests of «green growth» of the Ukrainian nature reserve fund objects. *Environmental Economics*, 10(1), 93–104. <https://doi.org/10.21511/ee.10.1.2019.07>. [in English].

Homanyuk, M., Khodosovtsev, O., Moysiienko, I., Ponomaryova, O., & Zharonkin, V. (2023). Ukrainian facilities of the nature reserve fund in the conditions of war and Russian occupation. *Ekonomichna ta Sotsialna Geografiya*, 89, 31–41. <https://doi.org/10.17721/2413-7154/2023.89.31-41> [in English].

Ishchuk, L.P., Kurka, S.S., & Ishchuk, G.P. (2018). From the experience of training specialists of forestry and landscape gardening. Professional competency of modern specialist: means of formation, development and improvement: monograph. Warsaw: BMT Eridia Sp. z o.o., 285–302 [in English].

Kolodezhna, V., Vasyliuk, O., Spinova, Yu., & Simonov, E. (2022). Ukraine War Environmental Consequences, *Journal UWEC*, 6. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35785.42084> [in English].

Kucher, A., Honcharova, A., Kucher, L., Bieloborodova, M., & Bondarenko, L. (2023). Impact of War on the Natural Preserve Fund: Challenges for the Development of Ecological Tourism and Environmental Protection. *Journal of Environmental Management and Tourism*, 14, 2414. [https://doi.org/10.14505/jemt.v14.5\(69\).23](https://doi.org/10.14505/jemt.v14.5(69).23) [in English].

Makedon, V., Mykhailenko, O., & Dzyad, O. (2023). Modification of Value Management of International Corporate Structures in the Digital Economy. *European Journal of Management Issues*, 31(1), 50–62. <https://doi.org/10.15421/192305> [in English].

Scholtens, B. (2017). Why Finance Should Care about Ecology. *Trends in Ecology and Evolution*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2017.03.013> [in English].

Shvedun, V., et al. (2023). Evaluation of environmental security of Ukraine during the Russian invasion: state, challenges, prospects. *Journal of Environmental Management and Tourism* 14(3): 787–798. [https://doi.org/10.14505/jemt.14.3\(67\).18](https://doi.org/10.14505/jemt.14.3(67).18) [in English].

Tsvyakh, O., & Openko, I. (2017). Main directions of urban land optimization in Kiev agglomeration, *Baltic Surveying International Scientific Journal*, 6 (1), 60–65 [in English].

Vasyliuk, O. (2022). Impact of the war on the objects of the nature reserve fund. Ukrainian Nature Conservation Group. [Electronic resource] URL: <http://surl.li/mnmgk> (access date 10.01.2020) [in English].

Wang, C., & Dong, G. (2019). Research on Green Financial Ecology Construction Based on Low Carbon Economy. *Ecology*, vol. 107, 3635–3641. [Electronic resource] URL: <http://www.ekolojidergisi.com/article/research-on-green-financial-ecology-construction-based-on-low-carbon-economy-6006> (access date 10.01.2020) [in English].

Zamula, I., & Shavurska, O. (2023). Strategic directions for restoration of environmental security of the Polissia region in the post-war period. *Journal of Innovations and Sustainability*, 7(1), 02. <https://doi.org/10.51599/is.2023.07.01.02> [in English].

Отримано: 26.09.2023
Прийнято: 21.10.2023



УДК 504.05; 504.064.2
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.15>

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ЯК ІНСТРУМЕНТ СИСТЕМИ УХВАЛЕННЯ РІШЕНЬ ТА ІНФОРМУВАННЯ ГРОМАДСЬКОСТІ

О. В. Черба¹

Публікація присвячена дослідженню комплексного впливу діяльності людини на навколишнє природне середовище країни. Актуальність теми дослідження зумовлена невідпинним процесом погіршення довкілля, що негативно впливає на стан здоров'я і якість життя українців, екосистеми країни та генерує загрози національній безпеці. У зв'язку із цим з'являється нагальна потреба в системному науковому підході до оцінювання техногенного навантаження на природне середовище, що є необхідною умовою для своєчасного виявлення екологічних проблем і визначення шляхів їх подолання.

Метою дослідження є покращення роботи системи ухвалення рішень та інформування громадськості завдяки комплексному підходу до оцінювання антропогенного впливу на навколишнє природне середовище. Для досягнення мети поставлені такі завдання: здійснити аналіз поточного стану питання щодо забезпеченості системи ухвалення рішень екологічною інформацією, розробити структуру комплексного підходу до оцінювання, провести оцінку антропогенного впливу на навколишнє природне середовище країни.

Результатом дослідження є наявність комплексної, достовірної, легкодоступної та зрозумілої екологічної інформації щодо величини антропогенного навантаження на навколишнє природне середовище та кожен його складову частину.

Практичне значення отриманих результатів у галузі раціонального природокористування й екологічної безпеки полягає в удосконаленні методології комплексного оцінювання техногенного впливу на довкілля для використання в заходах підтримки ухвалення управлінських рішень, полегшення інтерпретації й узагальнення даних, отриманих системою моніторингу довкілля, для ранжирування адмінтериторій за рівнем техногенного навантаження, інформування громадськості про стан навколишнього природного середовища адмінтериторії, динаміку його змін, підвищення її екологічної свідомості.

Ключові слова: навколишнє природне середовище, антропогенний вплив, природокористування, напрями дослідження, екологічні показники.

¹ здобувач вищої освіти ступеня доктора філософії, науковий співробітник лабораторії досліджень екологічної стійкості об'єктів довкілля та природних територій особливої охорони (Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків)
e-mail: o.cherba@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8600-1319

COMPLEX APPROACH TO ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT AS A TOOL OF THE DECISION-MAKING SYSTEM AND PUBLIC INFORMATION

O. V. Cherba

The publication is dedicated to the study of the complex impact of human activity on the country's environment. The relevance of the research topic is due to the ongoing process of environmental degradation, which negatively affects the health and quality of life of Ukrainians, the country's ecosystems, and generates threats to national security. In this regard, there is an urgent need for a systematic scientific approach to assessing the anthropogenic impact on the environment, which is a prerequisite for timely identification of environmental problems and determining ways to prevent and overcome them. The purpose of the study is to improve the decision-making system and inform the public through a comprehensive approach to assessing the anthropogenic impact on the natural environment. To achieve this goal, the following tasks have been set: to analyze the current state of the issue of environmental information provision to the decision-making system, to develop a structure of an integrated approach to assessment, to assess the anthropogenic impact on the country's environment.

The result of the study is the availability of comprehensive, reliable, easily accessible and understandable environmental information on the amount of anthropogenic load on the surrounding natural environment and each of its components.

The practical significance of the obtained results in the field of rational nature management and environmental safety lies in the improvement of the methodology of comprehensive assessment of man-made impact on the environment for use in measures to support management decision-making, facilitating the interpretation and generalization of data obtained by the environmental monitoring system, for ranking administrative territories by the level of man-made load, informing the public about the state of the natural environment of the administrative territory and the dynamics of its changes and raising its environmental awareness.

Key words: environment, anthropogenic impact, nature management, ecological portrait, directions of research, environmental indicators.

Вступ

У процесі діяльності людства утворюється велика кількість різноманітних відходів, які потрапляють у біосферу та призводять до забрудненості й деградації навколишнього природного середовища (далі – НПС), негативно впливають на стан усього живого. Як наслідок – забруднення атмосфери, гідросфери та літосфери, руйнування природних екосистем, зменшення біорізноманіття, збільшення кількості людей із проблемами здоров'я.

Натепер актуальним завданням у роботі природоохоронної сфери є мінімізація антропогенного впливу на довкілля, створення оптимальних умов для життєдіяльності людини та збереження того, що людину оточує і із чим вона взаємодіє, тобто впровадження системи збалансованого природокористування, збереження та відновлення природних екосистем (Про охорону ..., 1991; Конвенція ..., 1998; Про основні ..., 2019).

Виконання цього завдання безпосередньо залежить від ефективності роботи системи ухвалення управлінських рішень на державному, регіональному та місцевому рівнях, яка, у свою чергу, спирається на дані, отримані системою моніторингу довкілля. Важливим моментом є долучення громад-

ськості до процесу ухвалення рішень і підвищення рівня екологічної свідомості нації.

Натепер незадовільний стан Державної системи моніторингу довкілля вважається однією з першопричин екологічних проблем України (Про основні ..., 2019; Про рішення ..., 2020). Звіти про стан довкілля не відповідають потребам екологічної політики, не задовольняють потреби зацікавлених сторін у частині зв'язків між різними розділами звітів, наочності представлення матеріалів, їхньої лаконічності (Результативність ..., 2017).

У зв'язку із цим є нагальна потреба в системному науковому підході до комплексного оцінювання техногенного навантаження на НПС, аналізі та систематизації наявних даних щодо впливу діяльності людини на довкілля, оцінці поточної екологічної ситуації та прогнозуванні змін. Нині більшість сучасних робіт щодо оцінювання якості НПС стосуються або якогось компонента довкілля (атмосферне повітря, водні ресурси, ґрунти, біорізноманіття тощо), або конкретного регіону з визначеним рівнем економічного розвитку (Осауленко, 2020; Чугай, 2020; Бандурка, 2023). Велика кількість робіт присвячена визначенню індикаторів екобезпеки країни та біоіндика-

ції (Гончаренко, 2017; Харламова, 2021; Хом'як, 2020; Черенкевич, 2021).

Оцінювання й інтерпретація техногенного впливу на довкілля – це складний процес, пов'язаний з аналізом великої кількості різноманітної інформації та поєднанням її в єдину систему з використанням єдиних уніфікованих різними країнами методів. Це дає можливість узгоджувати екологічну звітність, виконувати спільні транскордонні дослідження, наприклад проводити моніторингові роботи, оцінку впливу на довкілля, брати участь у процедурі стратегічної екологічної оцінки. В умовах активного процесу євроінтеграції пріоритетними для України є підходи Організації економічного співробітництва та розвитку і Європейської економічної комісії ООН. Однак для підвищення якості аналітичної частини оцінювання антропогенного впливу їх необхідно адаптувати й оптимізувати, беручи до уваги таке:

– навколишнє природне середовище – це складна система, яка складається з атмосферного повітря, водних і земельних ресурсів, флори, фауни, включає діяльність людства, їхній взаємозв'язок і вплив кожного компоненту системи один на одного;

– оцінювання повинне ґрунтуватись на існуючій у країні статистичній і моніторинговій системі збору даних;

– необхідно уникнути надмірності та знайти баланс між кількістю та якістю (закон кількісних і якісних змін діалектики та принцип бритви Оккама).

Шляхом наукового аналізу методичних підходів до комплексного оцінювання з'ясовано, що більш ефективною є оцінка, яка має таку структуру: напрями – екологічні показники – статистичні показники (О.В. Черба).

Матеріал і методи

Матеріалами дослідження є статистичні дані, розміщені на сайті Держстату України, у Статистичних збірниках «Довкілля України» та в Національних доповідях про стан навколишнього природного середовища в Україні (Державна ..., 2014–2023; Міністерство ..., 2009–2021).

Під час дослідження з використанням методу аналізу ієрархій Томаса Л. Сааті враховано безпосередній внесок усіх складових частин у загальну оцінку антропогенного впливу на довкілля для забезпечення балансу між окремими блоками оцінювання. Побудовано п'ятирівневу ієрархію (рис. 1), де:

1 рівень – це мета дослідження.

2 рівень – напрями дослідження – чинники, які безпосередньо впливають на досягнення мети. Оцінка техногенного навантаження на НПС проводиться за чотирма напрямками, які або відчують антропогенний вплив, або характеризують його: атмосферне повітря, водні ресурси, земельні ресурси, ґрунти та відходи.

3 рівень – критерії, за якими проводиться дослідження. Як критерії, з позиції яких розглядався антропогенний вплив, використано вплив на здоров'я населення та на біорозмаїття (флору і фауну).

4 рівень – екологічні показники – чинники, від яких залежать вершини 2-го рівня. Це характерні екологічні дані, за якими можна судити про зміни окремих факторів впливу на навколишнє природне середовище.

5 рівень – статистичні показники, тобто безпосередньо статистичні дані, які визначають екологічні показники та за допомогою яких здійснюється оцінювання антропогенного впливу на НПС.

Відповідно до прийнятої ієрархії здійснене експертне попарне порівняння всіх елементів ієрархії, побудовані матриці попарних порівнянь. До роботи залучено п'ять кваліфікованих у цій галузі експертів. Узгодженість думок експертів розраховано так:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n a_{ij} \cdot W_{\text{норм } i}, \quad (1)$$

$$I_c = \frac{\lambda - n}{n-1} \leq 0,2, \quad (2)$$

$$OC = \frac{I_c}{I_{cc}} \leq 0,1, \quad (3)$$

де λ – значення матриці;

I_c – індекс узгодженості;

OC – відношення узгодженості;

a_{ij} – геометричне середнє за стовбцем матриці;

$W_{\text{норм } i}$ – нормоване середнє геометричне значень попарних порівнянь за рядком матриці;

I_{cc} – середнє значення індексу узгодженості експертів;

n – кількість критеріїв.

У результаті обчислень отримано узагальнені пріоритети всіх складових частин комплексної оцінки антропогенного впливу на НПС. На думку експертів, найбільше антропогенна діяльність впливає на атмосферне повітря (39,9%) і водні ресурси (28,0%), меншою мірою – на земельні ресурси (17,9%) і відходи (14,2%). Найбільшим антропоген-

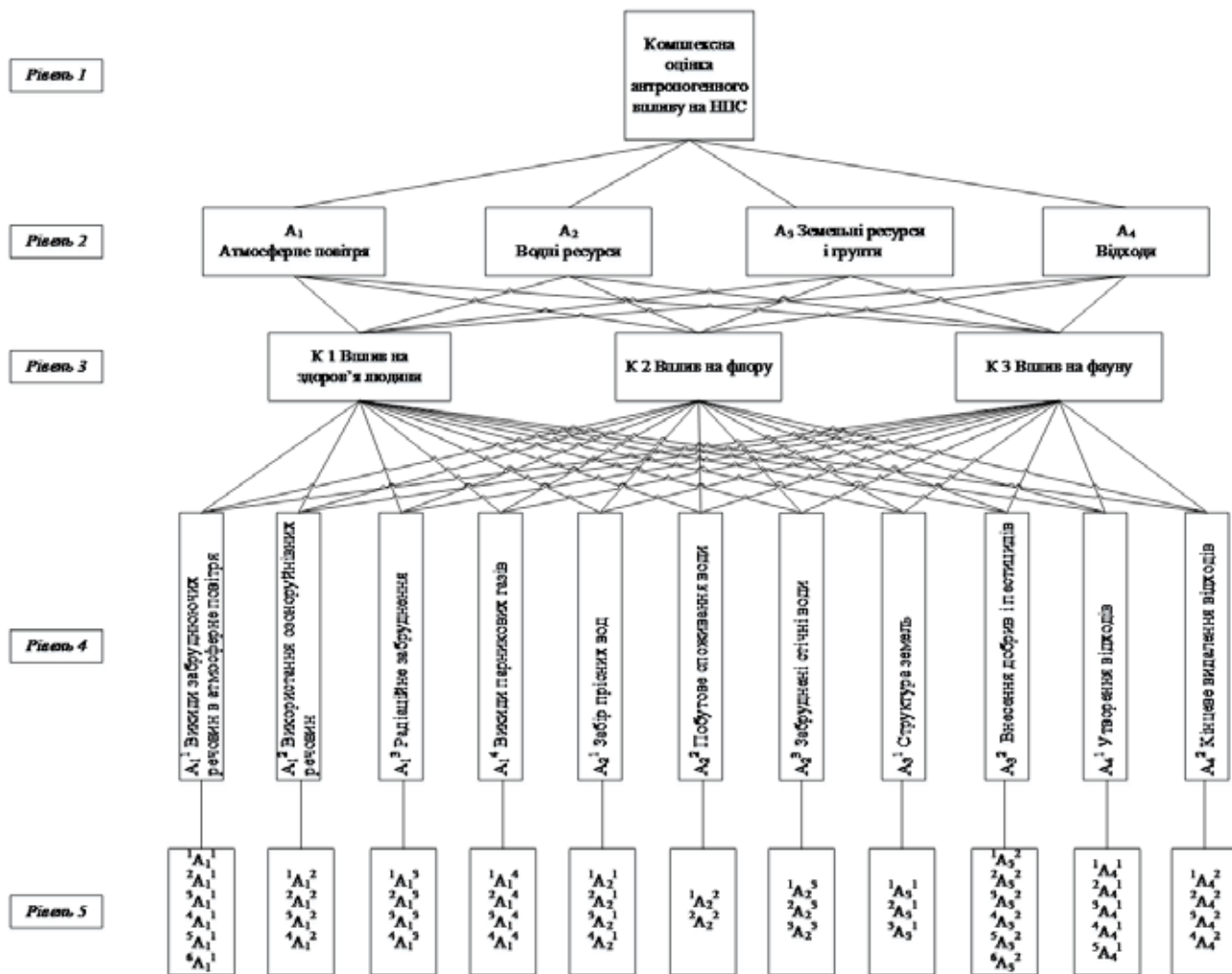


Рис. 1. Графічне представлення ієрархічної структури оцінювання антропогенного впливу на НПС

ним чинником для атмосферного повітря є викиди забруднюючих речовин (39,0%), для водних ресурсів – забруднені стічні води (46,1%) і забір прісних вод (34,3%), для земельних ресурсів – структура земель (54,0%) і внесення добрив і пестицидів (46,0%), для відходів – утворення відходів (62,5%). Аналогічним чином отримано значення внеску кожного статистичного показника в загальну оцінку.

Комплексна оцінка антропогенного впливу на НПС складається із чотирьох етапів:

- нормування статистичних показників;
- обчислення екологічних показників;
- проведення оцінки за кожним напрямом дослідження;
- проведення комплексної оцінки.

Розрахунки проводяться з урахуванням внеску кожного структурного елементу оцінювання.

Для переведення фізичних одиниць вимірювання в умовні здійснюється нормування статистичних показників за формулою:

$$\left| \widetilde{\xi A}_i^j \right| = \frac{|\xi A_i^j|_{\text{звіт.рік}}}{|\xi A_i^j|_{\text{max}}} \cdot 10, \quad (4)$$

де $|\widetilde{\xi A}_i^j|$ – ξ -ий статистичний показник, необхідний для визначення j -го екологічного показника за i -м напрямом;

$|\xi A_i^j|_{\text{звіт.рік}}$ – значення ξ -го статистичного показника за звітний рік для визначення j -го екологічного показника за i -м напрямом;

$|\xi A_i^j|_{\text{max}}$ – максимальне значення ξ -го статистичного показника, що обирають з переліку років, для яких розраховують j -ий екологічний показник за i -м напрямом;

10 – максимальне значення N-бальної (безрозмірної) шкали.

Таблиця 1

Кожний екологічний показник в кінцевому вигляді являє собою лінійну згортку значень статистичних показників:

$$|A_i^j| = \frac{\sum_{\xi} b_{\xi} \cdot |\widetilde{\xi A_i^j}|}{m_i^j}, \quad (4)$$

де $|A_i^j|$ – значення j -го екологічного показника за i -им напрямом;

$\sum_{\xi} b_{\xi} \cdot |\widetilde{\xi A_i^j}|$ – сума всіх ξ -х значень статистичних показників, складників j -го екологічного показника за i -м напрямом;

m_i^j – кількість статистичних показників, що входять до складу j -го екологічного показника ($\xi = 1 \dots m$).

Комплексна оцінка антропогенного впливу на навколишнє природне середовище розраховується як середнє арифметичне оцінок усіх напрямів, які, у свою чергу, визначаються на підставі усереднення значень екологічних показників цього напрямку.

Градування величини антропогенного впливу на адмінтериторію проводиться на підставі 10-бальної шкали оцінювання (табл. 1). Антропогенне навантаження на довкілля умовно поділене на п'ять діапазонів від «задовільного» до «критичного», завдяки чому можна ранжувати адмінтериторії за величиною антропогенного навантаження

Градування величини антропогенного впливу згідно з бальною оцінкою

Характеристика антропогенного впливу	Інтервал балів
задовільний	$0,1 \leq F_1 \leq 2$
незначний	$2 < F_2 \leq 4$
істотний	$4 < F_3 \leq 6$
небезпечний	$6 < F_4 \leq 8$
критичний	$8 < F_5 \leq 10$

за територіальним і часовим принципами. Отримана величина є відносною характеристикою антропогенного впливу за конкретний розглянутий проміжок часу.

Результати

У процесі дослідження проведено оцінювання антропогенного навантаження на навколишнє природне середовище України за 2000–2019 рр. Вихідними даними для обчислень є офіційні статистичні дані (табл. 2–5). Оцінку антропогенного впливу на атмосферне повітря проведено за двома екологічними показниками, оскільки інші не забезпечені статистичними даними за даний період часу та в даному територіальному контексті. Жирним шрифтом у таблицях виділено максимальне значення кожного статистичного показника, відповідно до якого здійснювалось нормування.

Таблиця 2

Статистичні дані для напрямку «Атмосферне повітря», A_1

Статистичний показник, ξA_1^j	Рік							
	2000 р.	2005 р.	2010 р.	2015 р.	2016 р.	2017 р.	2018 р.	2019 р.
ЕП «Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря», A_1^1								
Обсяг промислових викидів від стаціонарних джерел забруднення, тис. т/рік	3 959,4	4 464,1	4 131,6	2 857,4	3 078,1	2 584,9	2 508,3	2 459,5
Обсяг промислових викидів від пересувних джерел забруднення, тис. т	1 949,2	2 151,5	2 546,4	1 663,9	1 608,5	1 645,7	1 612,9	1 659,5
Загальний обсяг промислових викидів, тис. т/рік	5 908,6	6 615,6	6 678,0	4 521,3	4 686,6	4 230,6	4 121,2	4 108,3
Щільність загальних викидів забруднюючих речовин, кг/км ²	9 787	10 958	11 062	7 489	776	701	683	681

Продовження таблиці 2

Статистичний показник, A_1^j	Рік							
	2000 р.	2005 р.	2010 р.	2015 р.	2016 р.	2017 р.	2018 р.	2019 р.
Обсяг викидів забруднюючих речовин у розрахунку на одну особу, кг/1 особу	80,5	94,8	90,0	66,8	72,3	61,0	59,3	58,5
Відношення загального обсягу викидів забруднюючих речовин до обсягу ПТВ, тис. т/млн грн	32,34	22,88	6,40	2,54	2,17	1,61	1,35	1,36
ЕП «Викиди парникових газів», A_1^4								
Обсяги викидів за основними парниковими газами прямої дії, тис. т CO ₂ -екв.	203	152	198,2	162	150,6	124,2	126,4	121,3
Щільність загальних викидів парникових газів, т CO ₂ -екв/км ²	0,37	0,25	0,33	0,27	0,25	0,21	0,21	0,20
Викиди парникових газів у розрахунку на одну особу, кг CO ₂ -екв/1 особу	4,4	3,2	4,3	3,8	3,5	2,9	3,0	2,9

Таблиця 3

Статистичні дані для напряму дослідження «Водні ресурси», A_2

Статистичний показник, A_2^j	Рік							
	2000 р.	2005 р.	2010 р.	2015 р.	2016 р.	2017 р.	2018 р.	2019 р.
ЕП «Забір прісних вод», A_2^1								
Загальний об'єм забору води з усіх природних об'єктів, млн м ³ /рік	18 282	15 182	14 846	9 699	9 685	9 601	11 269	11 111
Загальний об'єм забору прісних вод, млн м ³ /рік	17 466	14 255	13 916	9 109	9 325	8 635	10 705	10 596
Використання прісних вод, млн м ³ /рік	12 175	9 360	8 886	6 556	6 608	6 284	6 790	6 821
Забрано води із природних джерел у розрахунку на одну особу, м ³ /1 особу на рік	372	322	323	227	227	226	266	265

Продовження таблиці 3

Статистичний показник, §A ₂ ^j	Рік							
	2000 р.	2005 р.	2010 р.	2015 р.	2016 р.	2017 р.	2018 р.	2019 р.
ЕП «Побутове споживання води», A₂²								
Об'єм води, що використовується для задоволення господарсько-питних та інших потреб населення, млн м ³ /рік	3 311	2 327	1 917	1 267	1 239	1 174	1 171	1 148
Об'єм води, що використовується для задоволення господарсько-питних та інших потреб населення, у розрахунку на одну особу, м ³ /1 особу на рік	67,3	49,4	41,8	29,6	29,1	27,7	27,7	27,3
ЕП «Забруднені стічні води», A₂³								
Водовідведення в поверхневі водні об'єкти, млн м ³	10 517	8 553	7 817	5 343	5 399	4 715	5 210	5 374
Частка забруднених зворотних вод, скинутих у поверхневі водні об'єкти	0,32	0,4	0,22	0,16	0,13	0,21	0,18	0,14
Обсяги скидання в поверхневі водні об'єкти забруднених зворотних вод, млн м ³	3 313	3 444	1 744	875	698	997	952	737

Таблиця 4

Статистичні дані для напряму дослідження «Земельні ресурси і ґрунти», A₃

Статистичний показник, §A ₃ ^j	Рік							
	2000 р.	2005 р.	2010 р.	2015 р.	2016 р.	2017 р.	2018 р.	2019 р.
ЕП «Структура земель», A₃¹								
Площа с/г угідь, тис. га	41 827	41 722,2	41 576	41 507,9	41 504,9	41 489,3	41 329	41 310,9
Частка с/г угідь від загальної площі земель	0,693	0,691	0,689	0,688	0,688	0,687	0,685	0,684
Забудовані землі, тис. га	2 501,4	2 508,6	2 512,2	2 552,9	2 964,3	3 597,8	3 811,1	3 890,2
ЕП «Внесення добрив і пестицидів», A₃²								
Внесення мінеральних добрив, тис. т	281,9	560,5	1 064,2	1 415	1 728,9	2 028,1	2 150,6	2 142,5

Продовження таблиці 4

Статистичний показник, ξA_3^j	Рік							
	2000 р.	2005 р.	2010 р.	2015 р.	2016 р.	2017 р.	2018 р.	2019 р.
Внесення мінеральних добрив на 1 га оброблюваної площі, кг/га	60	72	84	98	110	123	134	131
Внесення органічних добрив, тис. т	28 964,1	13 387,3	9 963,6	9 662,7	9 162,9	9 273,9	10 674,7	10 429,8
Внесення органічних добрив на 1 га оброблюваної площі, кг/га	39,8	28,5	24,4	21,8	19,2	18,3	13,7	13,4
Внесення пестицидів, тис. т	-	-	-	-	-	-	25 341	24 324,6
Внесення пестицидів на 1 га оброблюваної площі, кг/га	-	-	-	-	-	-	1,6	1,5

Таблиця 5

Статистичні дані для напрямку дослідження «Відходи», A_4

Статистичний показник, ξA_4^j	Рік							
	2000 р.	2005 р.	2010 р.	2015 р.	2016 р.	2017 р.	2018 р.	2019 р.
ЕП «Утворення відходів», A_4^1								
Загальні обсяги утворення відходів, млн т	2,61	2,41	425,91	312,27	295,87	366,05	352,33	441,52
Утворення відходів на одиницю ВВП, кг/1 000 доларів США	780,8	677,4	1 159,6	957,5	883,8	1 073	999,7	1 023,2
Утворення ТПВ у розрахунку на 1 особу, кг/на 1 особу за рік	173,3	180	270	268,5	271	265,3	280,5	280,6
Утворення відходів I–III класів небезпеки в розрахунку на 1 км ² , кг/км ²	4,33	4,00	2,75	0,97	1,03	1,00	1,04	0,92

Продовження таблиці 5

Статистичний показник, A_4^j	Рік							
	2000 р.	2005 р.	2010 р.	2015 р.	2016 р.	2017 р.	2018 р.	2019 р.
Утворення відходів I–III класів небезпеки в розрахунку на одну особу, кг/на 1 особу за рік	53,1	51,2	36,2	13,7	14,6	14,3	14,8	13,2
ЕП «Кінцеве видалення відходів», A_4^2								
Загальний обсяг видалених, знешкоджених і захоронених відходів, млн т	0,76	0,95	311,65	152,30	157,38	169,80	169,52	239,00
Частка обсягу видалених, знешкоджених і захоронених відходів від загального обсягу утворення відходів	0,291	0,393	0,732	0,488	0,532	0,464	0,481	0,541
Площі під твердими побутовими відходами, тис. га	–	–	9 765,5	11 491,8	11 562,6	11 271,2	11 857,2	11 792,7
Накопичено відходів протягом експлуатації у місцях видалення відходів на кінець року, млн т	26,2	21,7	13 267,5	12 505,9	12 393,9	12 442,1	12 972,4	15 398,6

З огляду на складність і багатофакторний характер інформації щодо антропогенного впливу на НПС, результати оцінювання представлено у вигляді графічної інформації, що спрощує сприйняття, аналіз та інтерпретацію результатів. Цей набір включає в себе відомості щодо:

комплексного антропогенного впливу на довкілля України у 2000–2019 рр. (рис. 2);

динаміки змін антропогенного впливу на НПС країни за кожним напрямом дослідження (рис. 3);

порівняльної оцінки за напрямами дослідження за 2000–2019 рр. (рис. 4);

внеску кожного екологічного показника в загальну оцінку (рис. 5).

Обговорення

Комплексний вплив антропогенної діяльності на НПС України оцінюється як «істотний» до 2015 р. і як «незначні відхилення» у наступний період часу, що свідчить про покращення роботи системи ухвалення рішень у сфері природокористування.

Аналіз динаміки змін техногенного впливу на атмосферне повітря України показує, що за останні п'ять років вплив значно зменшився (з рівня 4,12–3,68 у 2000–2010 рр. до 3,10–2,25 у наступний період часу), характеризується як «незначний» для всіх екологічних показників, не має різких коливань і поступово зменшується, що свідчить про зменшення кілько-

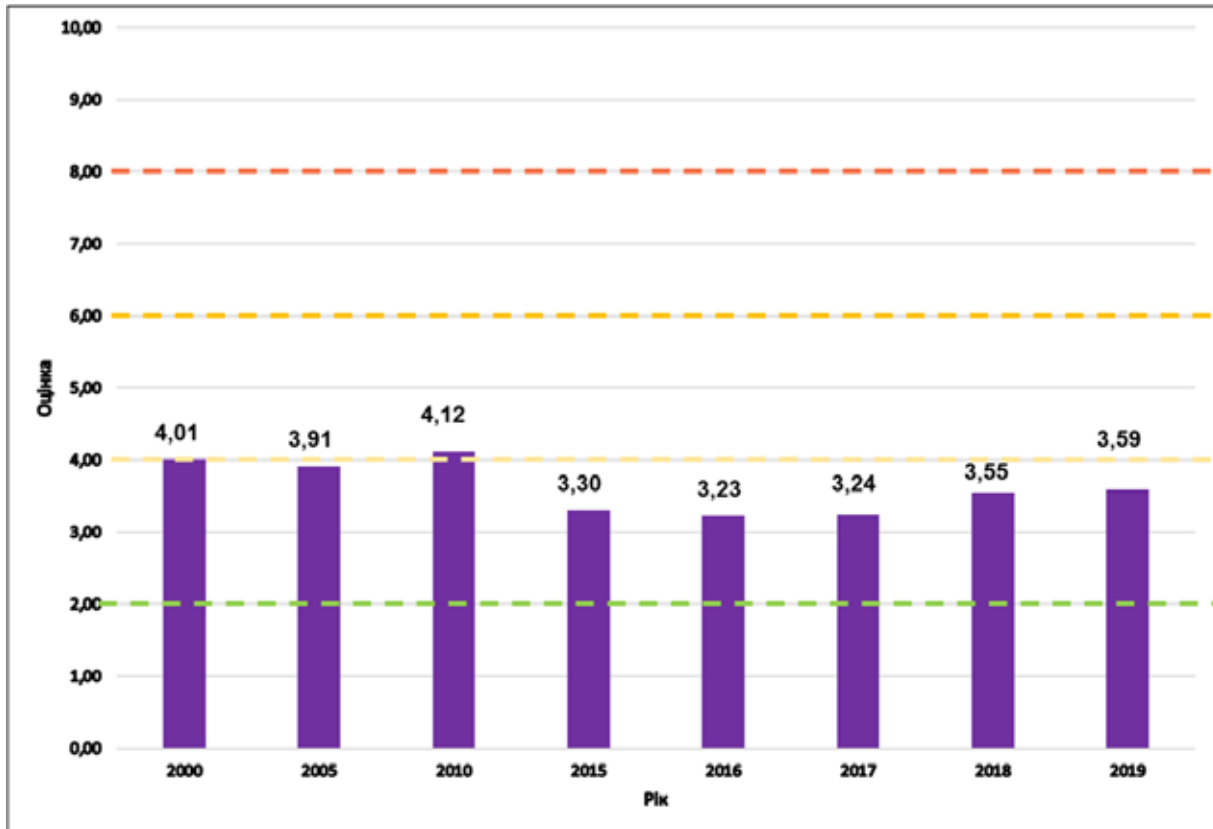
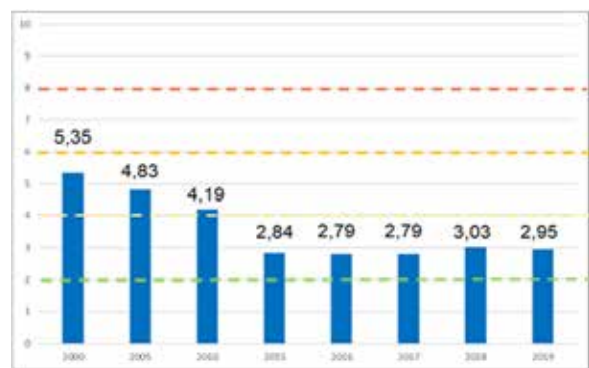


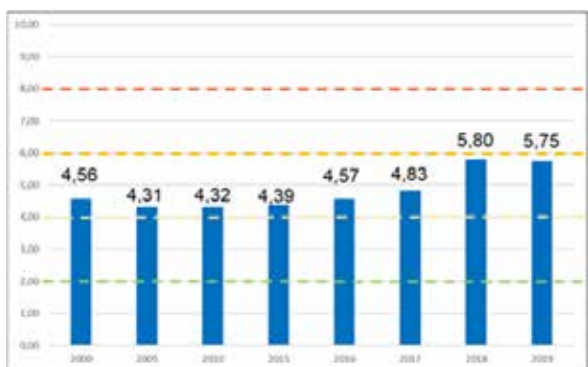
Рис. 2. Комплексне оцінювання антропогенного впливу на НПС України. 2000–2019 рр.



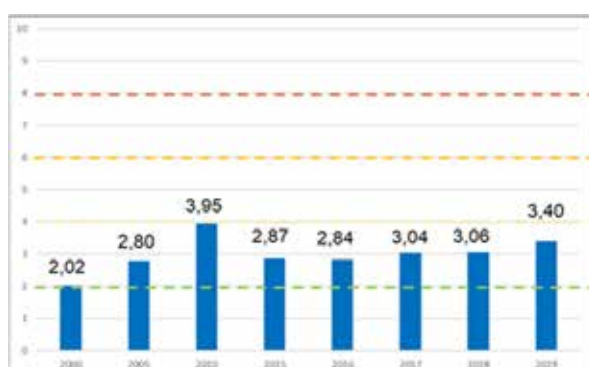
а) атмосферне повітря



б) водні ресурси



в) земельні ресурси та ґрунти



г) відходи

Рис. 3. Динаміка змін антропогенного впливу на НПС України за кожним напрямом. 2000–2019 рр.

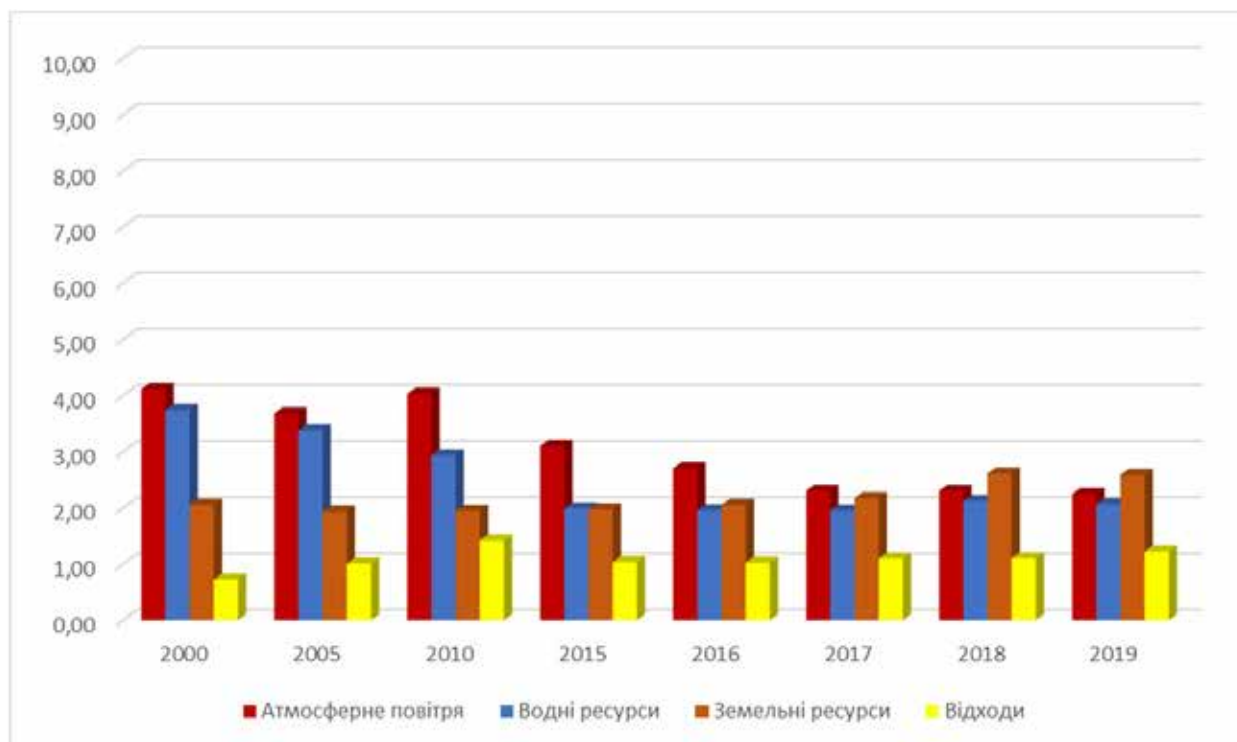


Рис. 4. Порівняльна оцінка антропогенного впливу на НПС України. 2000–2019 рр.

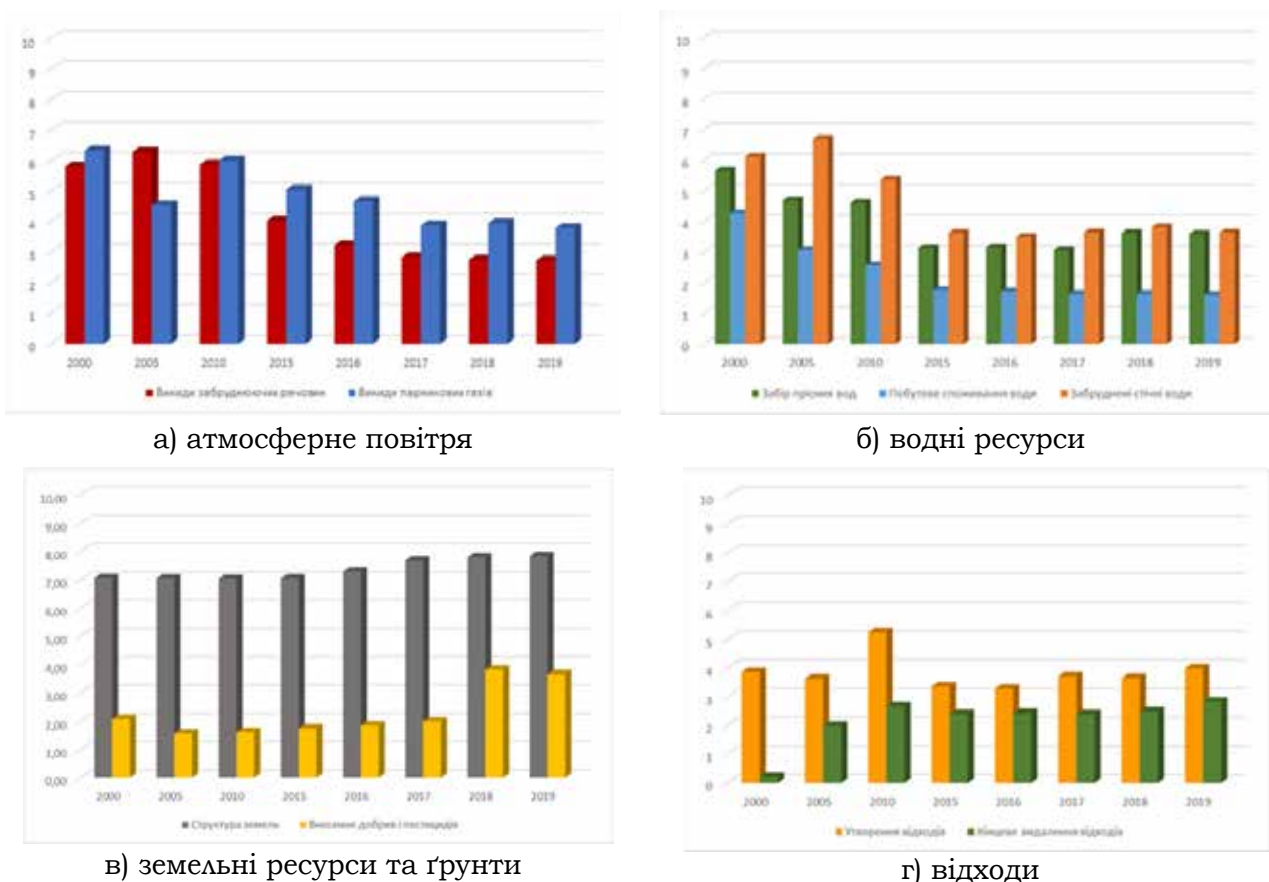


Рис. 5. Оцінка антропогенного впливу на НПС України за окремими екологічними показниками. 2000–2019 рр.

сті викидів від промислових підприємств, обладнання їх сучасними екологічними фільтрами, поступовий перехід на експлуатацію екологічного транспорту та все більше впровадження комплексних «зелених» альтернатив. Антропогенний вплив на водні ресурси так само із 2015 р. характеризується як «незначний», зменшився з рівня 5,35–4,19 у 2000–2010 рр. до 3,03–2,79, якість води поступово покращується, хоча значення ЕП «Забруднені стічні води» останні п'ять років залишаються на одному рівні (2,98–2,20), що свідчить про брак фінансування та модернізації у сфері очищення стічних вод. Техногенний вплив на земельні ресурси та ґрунти України досліджуваний період часу характеризується як «істотний» і поступово збільшується (з рівня 4,57–4,31 у 2000–2016 рр. до 5,80–4,83 в останні три роки). Водночас за ЕП «Структура земель» вплив перебуває на рівні «небезпечні порушення» та збільшується з рівня 7,06 у 2000 р. до 7,83 у 2019 р., що свідчить про дисбаланс між загальною кількістю земель і землями під сільськогосподарськими угіддями. Вплив відходів на довкілля країни має локальний характер, що відобразилось в оцінках, перебуває на рівні «незначний» за весь період часу. Однак поступово він збільшується (з рівня 2,02 у 2000 р. до 3,40 у 2019 р.), що свідчить про неефективні дії системи ухвалення рішень.

Аналогічним чином можна отримати інформацію щодо внеску кожного статистичного показника в загальну оцінку.

Висновки

Комплексний підхід до оцінювання антропогенного впливу на навколишнє природне середовище охоплює всі компоненти довкілля, біоту, є зрозумілим з погляду системного аналізу, легким для сприйняття громадськістю та зручним для використання системою ухвалення рішень. Він адекватно характеризує тенденції та характер змін основних чинників і загроз техногенного походження на адмінтериторіях України; сприяє покращенню роботи системи підтримки управлінських рішень у сфері природокористування в частині обґрунтування та впровадження природоохоронних заходів, що спрямовані на покращення стану довкілля та здоров'я населення; дозволяє інформувати громадськість про стан навколишнього природного середовища адмінтериторії та динаміку його змін, тим самим підвищує екологічну свідомість.

Даний підхід дозволяє узагальнити та полегшити інтерпретацію даних, представлених Державною системою моніторингу довкілля, у частині наочності представлення матеріалів, їхньої лаконічності, зв'язків між різними розділами звітів.

Графічна форма представлення результатів оцінювання дозволяє візуалізувати екологічну інформацію, що полегшує її сприйняття. Графічний набір можна змінювати залежно від поставлених завдань, що дозволяє використовувати його під час ухвалення управлінських рішень, проведення стратегічної екологічної оцінки, для інформування громадськості, звітування щодо результатів проведення післяпроектного моніторингу.

Список використаної літератури

Бандурка О.І. Методи і алгоритми аналізу геоданих для рішення задачі оцінки антропогенного впливу на довкілля : дис... д-ра філософії : 121 – Інженерія програмного забезпечення. Київ, 2023. 199 с.

Гончаренко І.В. Фітоіндикація антропогенного навантаження. Дніпро, 2017. 127 с.

Державна служба статистики України. Комплексні публікації [Електронний ресурс]. URL: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/publ1_u.htm (дата звернення 11.08.2023).

Державна служба статистики України. Статистичні збірники «Довкілля України» [Електронний ресурс]. URL: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv_u/07/Arch_dov_zb.htm (дата звернення 12.08.2023).

Конвенція про доступ до інформації, участь громадськості в процесі прийняття рішень та доступ до правосуддя з питань, що стосуються довкілля (Орхуська конвенція) [Електронний ресурс]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/card/994_015 (дата звернення 25.08.2023).

Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Національні доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні [Електронний ресурс]. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamku/ekologichnyj-monitoring/natsionalni-dopovidi-pro-stan-navkolynshnogo-pryrodnogo-seredovyshha-v-ukrayini> (дата звернення 12.08.2023).

Осауленко О.Г., Кобилянська Т.В. Статистика зміни клімату: європейський досвід та національна оцінка : монографія. Київ : ТОВ «АвгустТрейд». 2020. 344 с.

Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року : Закон України від 28 лютого 2019 р. № 2697-VIII. / Верховна Рада України [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2818-17> (дата звернення 20.08.2023).

Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25 червня 1991 р. № 1264-XII / Верховна Рада України [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text> (дата звернення 25.08.2023).

Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 14 вересня 2020 року «Про Стратегію національної безпеки України» : указ Президента України від 14 вересня 2020 року № 392/2020 [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/392/2020#Text> (дата звернення 20.08.2023).

Результативність та практична цінність звітів про стан довкілля для формування політики та інформування громадськості в Україні : робочий документ. Копенгаген: Європейське агентство з охорони навколишнього середовища. 2017. 20 с.

Харламова О.В. Науково-методологічні основи екологічної безпеки соціально-економічної зони в умовах комплексного впливу джерел небезпеки : дис... д-ра техн. наук : 21.06.01. Кременчук, 2021. 383 с.

Хом'як І.В., Василенко О.М., Гарбар Д.А., Андрійчук Т.В., Костюк В.С., Власенко Р.П., Шпаковська Л.В., Демчук Н.С., Гарбар О.В., Онищук І.П., Коцюба І.Ю. Методологічні підходи до створення інтегрованого синфітоіндикаційного показника антропогенної трансформації. *Екологічні науки*. 2020. № 5 (32), Т. 1. С. 136-141.

Черба О.В., Квасов В.А. Комплексна інтегральна оцінка антропогенного впливу на навколишнє природне середовище України. *Scientific and educational dimensions of natural sciences* : Scientific monograph. Riga, Latvia: «Baltija Publishing». 2023. С. 256-273.: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-289-0-12>

Черенкевич О.С. Екологічна безпека України: статистична оцінка та моделювання. дис. ... канд. економ. наук : 08.00.10. Київ, 2021. 190 с.

Чугай А.В. Техногенне навантаження на довкілля Миколаївської області. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. № 2. С. 27-33. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-149-2-27-33>

References (translated & transliterated)

Bandurka, O.I. (2023). Metody i alghorytmy analizu gheodanykh dlja rishennja zadachi ocinky antropoghennogho vplyvu na dovkillja [The methods and algorithms of geodata analysis for solving the problem of assessing the human impact on the environment]. Dys. na zdobuttja naukovogho stupenja doktora filosofiji, Nacionalnyj tekhnichnyj universytet Ukrajinjy «Kyjivskij politekhnichnyj instytut imeni Ighorja Sikorsjkogho» [Dissertation for obtaining the scientific degree of PhD, National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute"] [in Ukrainian].

Ghoncharenko, I.V. (2017). Fitoindykacija antropoghennogho navantazhennja [Phytoindication of anthropogenic load]. Dnipro [in Ukrainian].

Derzhavna sluzhba statystyky Ukrajinjy. Statystychni zbirnyky «Dovkillja Ukrajinjy» [State Statistics Service of Ukraine]. [Electronic resource] URL: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv_u/07/Arch_dov_zb.htm. (access date 11.08.2023) [in Ukrainian].

Derzhavna sluzhba statystyky Ukrajinjy. Kompleksni publikaciji [State Statistics Service of Ukraine]. [Electronic resource] URL: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/publ1_u.htm. (access date 12.08.2023) [in Ukrainian].

Konvenciya pro dostup do informaciyi, uchast gromadskosti v procesi priinyattya rishen ta dostup do pravosuddya z pitan, sho stosuyutsya dovkillja (Orhuska konvenciya) [Convention on Access to Information, Public Participation in Decision-making and Access to Justice in Environmental Matters (Aarhus Convention)]. [Electronic resource] URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/card/994_015 (access date 25.08.2023) [in Ukrainian].

Ministerstvo zakhystu dovkillja ta pryrodnykh resursiv Ukrajinjy. Nacionaljni dopovidi pro stan navkolyshnjogho pryrodnogho seredovyshha v Ukrajinjy [Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine]. [Electronic resource] URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/natsionalni-dopovidi-pro-stan-navkolyshnogo-pryrodnogo-seredovyshha-v-ukrayini>. (access date 12.08.2023) [in Ukrainian].

Osaulenko, O.Gh., & Kobylinsjka, T.V. (2020). Statystyka zminy klimatu: jevropejsjkyj dosvid ta nacionaljna ocinka [Climate change statistics: European experience and national assessment]. AvghustTrejd [in Ukrainian].

Pro Osnovni zasadi (strategiyu) derzhavnoyi ekologichnoyi politiki Ukrayini na period do 2030 roku [On the Basic Principles (Strategy) of the State Environmental Policy of Ukraine for the period up to 2030]. [Electronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>. (access date 20.08.2023) [in Ukrainian].

Pro ohoronu navkolishnogo prirodnoho seredovisha [On environmental protection]. [Electronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text> (access date 25.08.2023) [in Ukrainian].

Pro rishennya Radi nacionalnoyi bezpeki i oboroni Ukrayini vid 14 veresnya 2020 roku «Pro Strategiyu nacionalnoyi bezpeki Ukrayini» [On the decision of the National Security and Defense Council of Ukraine of September 14, 2020 “On the National Security Strategy of Ukraine”]. [Electronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/392/2020#Text> (access date 20.08.2023) [in Ukrainian].

Rezultativnist ta praktichna cinnist zvitiv pro stan dovkillya dlya formuvannya politiki ta informuvannya gromadskosti v Ukrayini [Effectiveness and practical value of environmental reports for policy-making and public awareness in Ukraine]. Kopengagen. 2017 [in Ukrainian].

Kharlamova, O.V. (2021). Naukovo-metodologichni osnovy ekologichnoyi bezpeky socialjno-ekonomichnoyi zony v umovakh kompleksnogo vplyvu dzhherel nebezpeky [Scientific and methodological bases of ecological safety of a socio-economic zone in the conditions of complex influence of sources of ecological danger]. Dys. na zdobuttja naukovogho stupenja doktora tekhnichnykh nauk [Doctoral dissertation, State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management] [in Ukrainian].

Khomiak, I.V., Vasylenko, O.M., Harbar, D.A., Andriichuk, T.V., Kostiuk, V.S., Vlasenko, R.P., Shpakovska, L.V., Demchuk, N.S., Harbar, O.V., Onyshchuk, I.P., & Kotsiuba, I.Iu. (2020). Metodologichni pidkhody do stvorennia intehrovanoho synfitoindykatsiinoho pokaznyka antropohennoi transformatsii [Methodological approaches to the creation of an integrated synphyto-indicative indicator of anthropogenic transformation]. *Ekologichni nauky [Ecological sciences]*, 5(32), 1, 136-141 [in Ukrainian].

Cherba, O.V., & Kvasov, V.A. (2023). Kompleksna integralna ocinka antropogennoho vplyvu na navkolishnye prirodne seredovishe Ukrayini [Comprehensive integral assessment of anthropogenic impact on the environment of Ukraine]. *Scientific and educational dimensions of natural sciences*, 256-273. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-289-0-12> [in Ukrainian].

Cherenkevych, O.S. (2021). Ekologichna bezpeka Ukrajiny: statystychna ocinka ta modeljuvannja [Ecological Safety of Ukraine: statistical estimation and modeling]. Dys. na zdobuttja naukovogho stupenja Candidate of Economic Sciences, Nacionaljna akademiya statystyky, obliku ta audytu [Dissertation for obtaining the scientific degree of Candidate of Economic Sciences National, Academy of Statistics, Accounting and Audit] [in Ukrainian].

Chughaj, A.V. (2020). Tekhnoghenne navantazhennja na dovkillja Mykolajivsjskoji oblasti [Technogenic Loads on the Environment of Mykolaiv region]. *Visnyk Vinnytsjckogho politekhnichnogho instytutu [Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute]*, 2, 27-33 [in Ukrainian].

Отримано: 31.08.2023

Прийнято: 17.10.2023

ЗМІСТ

БІОЛОГІЯ

Киричук Г. Є., Музика Л. В., Микула М. М., Веселовська О. А., Довжинець Ю. С. Вплив іонів кадмію на вміст окремих груп ліпідів в тканинах і органах <i>Lymnaea Stagnalis</i>	7
Астахова Л. Є. Вплив синтетичних миючих засобів на легеневе й поверхнєве дихання аловидів <i>Planorbarius (superspecies) corneus sensu lato</i> (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata, Planorbidae) гідромережі України.....	15
Василега П. А. Особливості функціонування серцево-судинної системи дітей 7–9 років після захворювання на COVID-19 (на прикладі Сумської області).....	23
Григоренко Т. В., Самчишина Л. В., Базаєва А. М., Коба С. А. Характеристика зоопланктону рибогосподарських водойм Львівської області.....	30
Петруша Ю. Ю. Вплив динатрієвої солі 2-(піридин-4-ілтіо)бурштинової кислоти на показники ішемічного пошкодження головного мозку щурів.....	42
Пихова О. В., Кучменко О. Б. Біологічні підходи до дослідження археологічних артефактів із місць археологічних розкопок на прикладі спектроскопічного аналізу бурштину.....	52

ГЕОГРАФІЯ

Хом'як І. В., Брень А. Л., Медвідь О. В., Хом'як А. К., Максименко І. Ю. Динаміка рослинності суходолу на території кар'єрів як модель постмілітарного відновлення дикої природи.....	61
--	----

ХІМІЯ

Камінський О. М., Денисюк Р. О., Чайка М. В., Писаренко С. В., Панасюк Д. Ю. Сорбція йонних форм Цинку (II) із водних розчинів поверхнями магніточутливих нанокмполімерів, модифікованих гідроксиапатитом.....	70
Шевченко О. П., Лут О. А., Шафорост Ю. А., Шкунида Д. П. Електрохімічні дослідження процесу відновлення тіаміну броміду на нікелевих гострійних структурах, модифікованих нанорозмірними частинками бісмуту.....	80
Шевчук В. А., Романова Л. О., Кудін В. Г., Судавцова В. С. Термодинамічні властивості і фазові рівноваги у сплавах системи Pb – Yb.....	90

АГРОНОМІЯ

Ільїна А. О., Ільїна В. Г., Чернякова О. І., Мозговий А. М. Оцінка мінливості врожаїв основних зернових культур і оптимізація їх посівних площ на території Миколаївської області.....	101
---	-----

ЕКОЛОГІЯ

Бондар О.Б., Мельник Є. Є., Бицюра Л. О., Дух О. І., Ярема О. М., Файфура В. В. Оцінювання екосистемних послуг зелених насаджень парку культури й відпочинку імені Тараса Шевченка (місто Кременець) з використанням інструменту i-Tree Eco.....	109
Герасимчук Л. О., Валерко Р. А., Станчик В. Б. Екологічний стан лісових екосистем Дочірнього підприємства «Коростишівський лісгосп АПК» за показниками стану й динаміки лісового фонду.....	117
Удовенко І. О., Мамчур В. В., Сержантова Ю. Ю. Об'єкти природно-заповідного фонду: аналіз наслідків українсько-російської війни.....	126
Черба О. В. Комплексний підхід до оцінювання впливу на довкілля як інструмент системи ухвалення рішень та інформування громадськості.....	140