Міністерство освіти і науки України
Житомирський державний університет імені Івана Франка

Український журнал природничих наук

№ 10

Науковий журнал,
заснований у 2022 році

Видавничий дім
«Гельветика»
2024

Видається за рішенням вченої ради Житомирського державного університету імені Івана Франка (протокол № 23 від 24.12.2024 року).

Головний редактор

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

Заступник головного редактора

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

Відповідальний секретар

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

Члени редакційної колегії

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Кривенко Анна – доктор сільськогосподарських наук, професор, завідувачка кафедри захисту, генетики і селекції рослин Одеського державного аграрного університету (Одеса, 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)

Марченко Тетяна – доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу селекції сільськогосподарських культур Інституту кліматично орієнтованого сільського господарства Національної академії аграрних наук України (Одеса, Україна)

Міщенко Сергій – доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри біології, здоров'я людини та методики навчання Глухівського національного педагогічного університету імені Олександра Довженка (Глухів, 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 дослідник, завідувачка відділу маркетингу та міжнародної діяльності, Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства Національної академії аграрних наук України (Одеса, Україна)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Наукове періодичне видання

Український журнал природничих наук: науковий журнал / [гол. ред. Овчаренко Микола, відп. ред. Шелюк Юлія]. Житомир: 2024. № 10. 286 с.

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

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

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

Сайт видання: naturaljournal.zu.edu.ua/index.php/ujns
Макетування: Молодецька О. І.

В усіх статтях збережено орфографію та пунктуацію авторів.

Підписано до друку 25.12.2024 р. Формат 60х90/8. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman
Друк різографічний. Ум. друк. арк. 44,87. Тираж 300. Замовлення 1224/888

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

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

© Житомирський державний університет імені Івана Франка, 2024

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

Ukrainian Journal of Natural Sciences

№ 10

Scientific journal,
founded in 2022

Publishing House
“Helvetica”
2024

Approved for publication by the Academic Council of Zhytomyr Ivan Franko State University
(protocol № 23 dated from 24.12.2024).

Editor-in-chief
Ovcharenko Mykola – Doctor habilitatus of Sciences (Biology), Senior Researcher, Professor of Institute of Biology and Earth Sciences Pomeranian University in Słupsk (Slupsk, 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)
Boymurodov Husniddin – Doctor of Sciences (Biology), Professor of Biotechnology Department of Samarkand Institute of Veterinary and Medicine (Samarkand, Uzbekistan Repuplic)
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)
Zając 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)
Kryvenko Anna – Doctor of Sciences (Agricultural), Professor, Head of the Department of Plant Protection, Genetics and Breeding, Odessa State Agrarian University (Odesa, 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 Motornyi 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)
Marchenko Tetiana – Doctor of Sciences (Agricultural), Senior Researcher, Head of the Department of Crop Breeding, Institute of Climate-Smart Agriculture of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine (Odesa, Ukraine)
Mishchenko Serhii – Doctor of Sciences (Agricultural), Senior Researcher, Associate Professor at the Department of Biology, Human Health and Teaching Methods. Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University (Hlukhiv, 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 Ilia – 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 and International Activities, Institute of Climate-Smart Agriculture, National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine (Odesa, Ukraine)
Semenyuk Nataliia – Doctor of Sciences (Biology), Senior Researcher of Institute of Hydrobiology NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
Sydorenko Serhii – PhD (Agricultural), Senior Researcher Laboratory of Forest Ecology, Ukrainian order "Sign of Honour" Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G. M. Vysotsky State Forest Resources Agency of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine (Kharkiv, Ukraine)
Stadnychenko Agnesa – Doctor of Sciences (Biology), Professor of Department of Zoology, Biological Monitoring and Nature Conservation Zhytomyr Ivan Franko State University (Zhytomyr, Ukraine)
Stunžėnas Virmantas – PhD (Biology and Ecology), Senior researcher of Parasitology laboratory of the Nature Research Centre of the Institute of Ecology (Vilnius, Lithuania)
Titov Yuriy – Doctor of Sciences (Chemistry), Senior Research at Taras Shevchenko National University (Kyiv, Ukraine)
Tomashyk Vasyl – Doctor of Sciences (Chemistry), Professor of Lashkariov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
Khomyak Ivan – PhD (Biology), Associate Professor of the Department of Ecology and Geography Zhytomyr Ivan Franko State University (Zhytomyr, Ukraine)
Chayka Mykola – PhD (Chemistry), Associate Professor of the Department of Chemistry Zhytomyr Ivan Franko State University (Zhytomyr, Ukraine)
Chekhniy Viktor – PhD (Geography), Senior Researcher, Scientific Secretary of the Institute of Geography of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
Chumak Volodymyr – PhD (Chemistry), Associate Professor of the Department of Chemistry Zhytomyr Ivan Franko State University (Zhytomyr, Ukraine)

Scientific Periodical

Ukrainian Journal of Natural Sciences / [editor Ovcharenko Mykola, co-editor-in-chief Sheliuk Yuliia].
Zhytomyr: 2024. № 10. 286 p.

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

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

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

Website: naturaljournal.zu.edu.ua/index.php/ujns
Modelling: Molodetska O. I.

Authors' spelling and punctuation are preserved in the articles.

Signed for printing 25.12.2024. Size 60x90/8. Offset Paper. Font Times New Roman
Risograph printing. Conventional printed sheets 44,87. Number of copies 300. Order 1224/888

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

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online
© Zhytomyr Ivan Franko State University, 2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

БІОЛОГІЯ

УДК 582.682.1:581.6
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.1

ТРАДИЦІЇ, МОЖЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ РОСЛИН РОДИНИ МОЛОЧАЙНІ (*EUPHORBIACEAE* JUSS.) У ПРОМИСЛОВОСТІ, МЕДИЦИНІ, ПОБУТІ ТА У ВИРОБНИЦТВІ ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ

Н. Я. Левчик[1], Н. В. Заіменко[2], Н. Є. Горбенко[3], Г. І. Скрипка[4]

У статті проводиться аналіз наукових літературних джерел, де в історичному аспекті висвітлюються результати комплексних досліджень рослин родини Euphorbiaceae, з'ясовуються їх ботанічні відкриття, біолого-морфологічні особливості, характер біохімічного вмісту та пов'язані із цим корисні властивості рослин, традиції стародавнього та реалії сучасного використання рослин у доказовій, альтернативній та народній медицинах, косметології, харчуванні, побуті, енергетиці, промисловості. Завдяки вмісту алканів, тритерпенів, фітостеринів, дубильних речовин рослини роду Euphorbia здійснюють ефективний, широкого спектру дії, лікувально-оздоровчий вплив на здоров'я людини. Ключовими лікувальними властивостями є протиракова, жарознижуюча, анальгетична, антиоксидантна, антимікробна, протизапальна та антиартритна дії. Понад 80 фітохімічних речовин міститься у складі ефірних олій видів Euphorbia, зокрема сесквітерпени та сесквітерпенові вуглеводні. Свіжі екстракти рослин містять вторинні метаболіти: сесквітерпени, дитерпени, стерини, флавоноїди та інші поліфеноли. Вагоме місце в житті та побуті людини рослини Euphorbiaceae займають, як джерело фітонутрієнтів, каучуку та біопалива. У країнах, де рослини є ендеміками, традиційним є використання рослин

[1] кандидат біологічних наук, науковий співробітник
(Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка НАН України, м. Київ)
e-mail: levchyk.n@ukr.net
ORCID: 0000-0001-8668-8763
[2] доктор біологічних наук, професор, член-кореспондент НАНУ, директор
(Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка НАН України, м. Київ)
e-mail: zaimenkonv@ukr.net
ORCID: 0000-0003-2379-1223
ResearcherID: AAJ-3096-2020
ScopusID: 6505833757
[3] кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри ботаніки, деревинознавства та недеревних ресурсів лісу
(Національний лісотехнічний університет України, м. Львів)
e-mail: nata.horbenko@gmail.com
ORCID: 0000-0002-6053-6582
[4] кандидит біологічних наук, науковий співробітник відділу квітниково-декоративних рослин
(Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка НАН України, м. Київ)
e-mail: anna.skrypka777@gmail.com
ORCID: 0009-0000-4299-1904

у народній медицині, кулінарії, побуті, будівництві та застосування рослинного латексу в якості молюскоцидних, пестицидних засобів або отрути для полювання. Рослини Euphorbiaceae корисні та перспективні, оскільки мають здатність використовувати C_3 та CAM-типи фотосинтезу, проте фізіологічний механізм процесів перемикання фіксації вуглецю вивчений недостатньо. Крім того, потрібні інтродукційні заходи щодо акліматизації та промислового вирощування рослин на території України, як перспективної лікарської, харчової та біопаливної сировини. Актуальними будуть дослідження щодо біохімічного вмісту, динаміки накопичення мікро- та макронутрієнтів, вивчення отруйних властивостей рослин, особливостей роботи C_3- та CAM-типу фотосинтезу в нових погодно-кліматичних та ґрунтових умовах України. Нові знання розширять сфери та ефективність використання рослин Euphorbiaceae у майбутньому, як джерело біопалива, біологічно активних екстрактів, вторинних метаболітів та чистих сполук, як компоненти лікарських засобів для лікування спектру захворювань, що в цілому буде сприяти зміцненню здоров'я та довголіття людей.

Ключові слова: *родина Молочайні, фармакологічні властивості, медичне застосування, латекс, біопаливо, джерело харчування, побутове використання.*

SPURGE FAMILY PLANTS (*EUPHORBIACEAE* JUSS.) IN INDUSTRY, MEDICINE, DAILY LIFE, AND FOOD PRODUCTION: TRADITIONS, OPPORTUNITIES, AND PROSPECTS

N. Ya. Levchyk, N. V. Zaimenko, N. Ye. Horbenko, H. I. Skrypka

The article analyzes scientific literary sources that present the results of complex studies of the spurge family plants from a historical perspective, their botanical discoveries, biological and morphological features, the nature of their biochemical content and related useful properties, and both ancient traditions and modern realities of the plants' use in evidence-based, alternative, and folk medicine, cosmetology, nutrition, daily life, energy, and industry. As they contain alkanes, triterpenes, phytosterols, and tannins, the Euphorbia plants have an effective and broad therapeutic and improving impact on human health. Their key medicinal properties are anticancer, antipyretic, analgesic, antioxidant, antimicrobial, anti-inflammatory, and anti-arthritic effects. The essential oils of Euphorbia species contain over 80 phytochemicals, including sesquiterpenes and sesquiterpene hydrocarbons. Fresh plant extracts have secondary metabolites: sesquiterpenes, diterpenes, sterols, flavonoids, and other polyphenols. Euphorbiaceous plants play an important role in human life, including daily life, as a source of phytonutrients, rubber, and biofuel. In countries where these plants are endemic ones, they are traditionally used in folk medicine, cooking, daily life, and construction, while their latex is used as a molluscicide, pesticide, or hunting poison. Spurge plants are beneficial and promising, since they are able to use C3 and CAM photosynthesis, though the physiological mechanism of carbon fixation switching is not yet sufficiently studied. Besides, acclimatization and industrial cultivation of these plants – as promising medicinal, food, and biofuel raw materials – requires introductory measures on the territory of Ukraine. Research of biochemical content and dynamics of accumulation of micro- and macronutrients, as well as study of poisonous properties of the plants and peculiarities of C3 and CAM photosynthesis in the new weather, climate, and soil conditions of Ukraine will be relevant. The new knowledge will expand the scope and effectiveness of the future use of Euphorbiaceae plants as a source of biofuels, biologically active extracts, secondary metabolites, pure compounds, and a component of medicinal products for treating a wide variety of diseases, which will generally contribute to the promotion of human health and longevity.

Key words: *Spurge family, pharmacological properties, medical use, latex, biofuel, food source, daily life use.*

Вступ

Нестримний розвиток цивілізації, створення матеріалів хімічного походження та відкриття нових технологій надають можливості змінювати натуральну сировину на штучні замінники у всіх сферах виробництва та побуту людини. І все це має фантастичні перспективи для виробників, виправдано дешевою ціною та економічною вигодою.

Проте, не всі штучно синтезовані медикаменти, синтетичні продукти харчування або токсичні предмети побуту є безпечними для людини та для довкілля. Тому, важливою ознакою сьогодення є пошук та виявлення у світовій флорі природних безпечних джерел рослинної сировини для харчової, косметичної, фармацевтичної, енергетичної та інших галузей промисловості.

Крім того, людство стоїть на межі поступового зменшення природних енергетичних ресурсів, таких як кам'яне вугілля та нафта. Ця ситуація, звісно, стимулює до стрімкої та масштабної заміни вичерпних корисних копалин на біопаливо та альтернативні джерела енергії.

Рослини родини *Euphorbiaceae* Juss. можна назвати рослинами майбутнього, оскільки вони є стійкими та невибагливими до умов зростання, достатньо відомими завдяки практичному використанню та накопиченим упродовж століть знанням. Знання фіксувались, починаючи від писемних згадок на шумерських глиняних табличках, медичних папірусах Стародавнього Єгипту, текстах греко-римської античності, у численних священних текстах, включно із Кораном та Біблією, і до трактатів цілої плеяди вчених та дослідників від Середньовіччя до наших днів. Завдяки багатому практичному використанню, культурним традиціям та наявності в місцевій флорі різних країн світу, уже є досвід із визнанням та застосуванням рослин *Euphorbiaceae* у нетрадиційній та традиційній світових медицинах, включно з китайською (Petrovska, 2012; Vikas Kurhekar, 2021).

Природна флора України нараховує 63 таксони багаторічних, рідше однорічних видів цієї родини, які можна зустріти на Поліссі і в Лісостепу, у степовій зоні, у Карпатах на гірських луках та полонинах (Лікарські рослини ..., 1992; Нечитайло та ін., 2000). Деякі види були піддані ретельним хімічним та фармакологічним дослідженням українських вчених-фармацевтів в середині XX ст. з метою дослідження, як джерела нових гіпотензивних, Р-вітамінних та діуретичних препаратів (Чаговець та ін., 1967). Велика зацікавленість з боку офіційної медицини рослинами родини *Euphorbiaceae*, їх фітонутрієнтами і біологічно-активними сполукам, різними класами природних сполук залишається та зростає з кожним днем, зокрема в стоматологічній сфері покладаються великі надії та очікування (Огієнко, 2023).

В Україні рицина звичайна *Ricinus communis* L. і деякі види молочаю внаслідок токсичності обмежені у використанні та вирощуванні як на присадибних ділянках, так і в умовах закритого ґрунту (Цебржинський і Орлова, 2013). Проте ботанічні сади України зібрали у своїх оранжереях цінні колекції сукулентних видів молочаю з різних флористичних областей, які створювали покоління науковців упродовж десятиліть, інколи століть, та є частиною національного надбання України (Капустян та ін., 2004; Гайдаржи, 2009).

Для відкриття нових перспектив та можливостей використання рослин родини *Euphorbiaceae* на теренах України, особливо в умовах глобального потепління, виникла необхідність детального аналізу набутого досвіду використання рослин *Euphorbiaceae* у світовій практиці.

Метою нашої роботи було провести огляд та аналіз наукових літературних джерел, встановити біологічні особливості та корисні властивості представників родини *Euphorbiaceae* Juss., висвітлити традиції, можливості та перспективи використання рослинної сировини молочаїв у харчуванні, фармакології, побуті, промисловості, енергетиці задля продовження наукових досліджень та розширення сфери їхнього використання в Україні.

Матеріал і методи

Матеріалом досліджень були рослини родини *Euphorbiaceae* Juss. колекцій провідних ботанічних садів України та Європи. У роботі користувались історичними та архівними джерелами, здійснювали огляд сучасних наукових публікацій із ботанічних, систематичних, морфолого-описових, екологічних досліджень. Опрацьовували гербарні зразки та фотографували живі колекції ботанічних садів. Назви рослин подані відповідно до останнього видання Королівських Ботанічних Садів К'ю, синоніми – за WFO Plant List (WFO, 2024).

Результати та їх обговорення

Люди упродовж розвитку цивілізації завжди використовували свою рідну флору, щоб задовольнити низку життєвих потреб, зокрема у їжі, паливі, одязі, будівництві будинків, виготовленні предметів побуту, виробництві хімічних та лікарських засобів. Цінні знання про рослини та їхні властивості передавалися з покоління в покоління природним чином у повсякденному житті. Мільйони людей світу покладаються на лікарські рослини для надання первинної медичної допомоги, отримання прибутків та підвищення добробуту. Сьогодні відомо від 50 000 до 70 000 видів рослин, які використовуються в традиційних і сучасних медичних системах світу (Özbilgin & Saltan Citoğlu, 2012).

Рослини родини *Euphorbiaceae* Juss. (Молочайні) відомі та застосовуються понад 2000 років у народній медицині різ-

них частин світу, включно з традиційною китайською, про що є свідчення в стародавніх літературних джерелах, лікарських трактатах та гомеопатичних фармакопеях (рис. 1) (Jian et al., 2018).

Рослини *Euphorbiaceae* використовували ще за часів Гіпократа (400 р. до н.е.) для лікування раку та інших серйозних захворювань, і тому вони описані в літературі стародавніх греків і римлян (Podolski-Renić, 2013). Знахарі та лікарі виготовляли та призначали натуральні рослинні препарати молочаю для профілактики та лікування численного переліку захворювань. Рослинами продукується низка біологічно активних інгредієнтів – вторинних метаболітів, які використовуються для виготовлення ліків, зокрема засобів гомеопатії, алопатії, медицини Юньнань та Аюрведи (Özbilgin & Saltan Citoğlu, 2012).

Рід *Euphorbia* L. (родина *Euphorbiaceae*) є третім за розміром родом покритонасінних рослин, нараховує майже 2000 видів. Цей рід має значне поширення та трапляється у всіх помірних та тропічних регіонах. Для цієї групи рослин характерною є велика різноманітність форм, від дрібних ефемерів трав'янистих однорічників або багаторічників, великих кущів, невеликих дерев, ґрунтопокривних напівкущів та кактусоподібних сукулентів (Гайдаржи, 2009; Salehi et al., 2019). Із 243 видів, які перебувають під загрозою та розміщені в Червоному списку Міжнародного союзу охорони природи, 170 видів (70%) перебувають під загрозою зникнення в категорії уразливих, зникаючих та перебуваючих у критичній небезпеці (Salehi et al., 2019; The IUCN Red List…).

Виявлено, що основними діючими компонентами рослин роду *Euphorbia* є алкани, тритерпени, фітостерини, дубильні речовини. Вважається, що поліфеноли та флаваноїди мають різні спектри направленості своєї дії (Aleksandrov et al., 2019). У разі застосування рослин *Euphorbia* для профілактики, лікування чи підтримання здоров'я людини вони здійснюють на її організм потужну біологічну активність широкого діапазону дії завдяки своєму багатому біохімічному вмісту (Salehi et al., 2019). Тому рослинну сировину деяких видів цього роду здавна використовували для лікування шкірних захворювань, новоутворень, мігреней, паразитарних інвазій та запальних процесів (Özbilgin & Saltan Citoğlu, 2012).

Відомо три напрямки використання рослин родини залежно від їх географічного зростання: лікування розладів травної системи (має дуже широке застосування у всьому світі, включаючи Україну, за винятком Австралії та Азії), засоби захисту від інфекцій/інвазій (головним чином у Південній Африці та Америці, Тихоокеанському, Азійсько-тропічному та Азійсько-помірному кліматі) та лікування захворювань шкіри/підшкірної клітинної тканини (зокрема в Австралії, Європі, в тому числі Україні, Азії та Північній Америці) (Цебржинський і Орлова, 2013; Salehi et al., 2019).

Крім того, із 33 видів, які згадуються в народній практиці світу, види роду

A B C D

Рис. 1. Ілюстрації книги M. Pietro Andrea Mattioli «Pedacio Diofcoride Anazarbeo della materia Medicinale» (1554): A – титульна сторінка; B – *Euphorbia paralias*; C – *Euphorbia characias;* D – збирачі лікарських трав в XVI ст. (художник Gherardo Cibo) (Sciencephotolibrery…)

Молочай (*Euphorbia* L.) – Euphorbia hirta L., E. thymifolia L. і E. lathyris L. – згадуються найчастіше (Salehi et al., 2019). В Аюрведичній медицині рослини E. hirta та латекс E. neriifolia L. є основними активними інгредієнтами численних аюрведичних препаратів та разом із *Ricinus communis* L., *Mallotus philippensis* (Lam.) Muell. Arg. традиційно вказуються у Ведах (The Ayurvedic Pharmacopoeia …, 2001; Mali Prashant & Panchal Shital, 2017).

Китайська традиційна медицина широко використовує Euphorbia helioscopia L., E. resinifera O. Berg, E. fischeriana Steud., у Чилі – E. thymifolia, у Північній Америці – E. maculata L., в Ефіопії повідомляється про використання E. heterophylla L. та E. prostrata Aiton. E. tirucalli L. – у Південній Америці, Індії, на Близькому Сході та в Африці (Salehi et al., 2019). У В'єтнамі застосовують рослини E. antiquorum L. для знеболення в стоматології (Salehi et al., 2019).

Euphorbia pekinensis Rupr. походженням з Азії, належить до переліку 50 основних трав, які найчастіше використовуються в традиційній китайській медицині, а її корінь показаний для очищення та дренування організму, проте має численні побічні ефекти та потребує обережного застосування (Hempen & Fischer, 2009).

Використання кожної рослини може бути багатогранним залежно від країни, її культури та традицій. Так, *E. hirta* у народній медицині Китаю, Філіппін та Нігерії широко використовують для лікування діареї, у той час як у В'єтнамі, Індії, Мозамбіку – для лікування дизентерії, а в Непалі, Австралії, на південному заході США та на Гавайських островах – для лікування легеневих захворювань. Латекс цієї рослини використовують переважно в Азії, зокрема Малайзії, для лікування шкірних захворювань, лихоманок та навіть венеричних захворювань. Населення Індії використовує відвар *E. hirta* для лікування поранень від укусів отруйних змій (Salehi et al., 2019).

На Русі багато видів молочаю також застосовувались в народній медицині без вивчення їхнього складу від водобоязні, «наврочення», для лікування проблем із шкірою, як проносний та блювотний засіб та навіть для лікування ракових пухлин (Цебржинський і Орлова, 2013).

Частини рослин, які можна практично використовувати – це коріння, насіння, латекс, деревина стебла, кора стебла, листки та цілі рослини. Повідомляється про використання квіток у *E. virgata* Waldst. & Kit., коренів у *E. apios* L., надземної частини у *E. coniosperma* Boiss. & Buhse (Özbilgin & Saltan Citoğlu, 2012; Pharmacopoeia of the PPRC).

Цілющі властивості рослинам надають вторинні метаболіти, які часто перебувають у складній суміші. Це ізопреноїдні компоненти, дитерпеноїди, здебільшого такі, як ятрофани, інгенани, латирани, тігліани тощо. Крім того, було виявлено сесквітерпеноїди, флавоноїди та стероїди. Сполуки рослин мають цілий спектр біологічної дії, до якого належать антипрофілеративна, цитотоксична, протимікробна та протизапальна, протиракова та актиоксидантна тощо (Özbilgin & Saltan Citoğlu, 2012; Podolski-Renić, 2013).

Ефірні олії, екстракти та чисті сполуки рослин *Euphorbiaceae* також надзвичайно активні, із широким спектром біологічної дії, спрямованої на підтримання та відновлення здоров'я людини. До складу ефірних олій входять понад 80 фітохімічних сполук, переважно насичених оксигеном сесквітерпенів та сесквітерпенових вуглеводнів, тоді як їх екстракти містять вторинні метаболіти: монотерпени, дитерпени, сесквітерпени, стерини, флавоноїди та інші поліфеноли (Salehi et al., 2019).

Екстракти та вторинні метаболіти молочаїв мають великий потенціал для використання у фармакології та медицині для лікування багатьох захворювань людини, переважно запальних процесів, раку та мікробних інфекцій (Salehi et al., 2019).

Онкологічні захворювання посідають друге місце у світі за поширеністю та причиною смертності людини, проте їхня кількість щороку збільшується. Традиційні методи лікування є занадто коштовними та мають цілий спектр побічних ефектів та рецидивів. Тому, пошук ефективних, безпечних протипухлинних препаратів рослинного походження став важливим напрямком протиракових досліджень.

Однією із незамінних у східній народній медицині рослин для лікування раку є *E. fischeriana* Steud. (syn. *E. pallasii* Turcz. ex Ledeb.) (рис. 2-А), яка зростає на сході Азії, переважно на півночі Китаю. Завдяки вмісту дитерпеноїдів рослина надзвичайно ефективна в концентрації 1 мг/мл проти кількох типів раку, зокрема злоякісної меланоми, карциноми легенів Льюїса та асцитичної гепатоми (Sun & Liu, 2011; Jian et al., 2018).

A B C D

Рис. 2. A – E. fischeriana Steud. (Liu, 2012); B – E. helioscopia L., фото Borremans P. (Meise Botanic Garden…);
C – E. poissonii Pax (Seidelt, 2021); D – E. nivulia Buch.-Ham., фото Dumont A-M (Meise Botanic Garden…)

Крім дитерпеноїдів у *E. fischeriana* виявлено тритерпени, стероїди, ароматичні компоненти, таніни та інші біологічно активі сполуки, які маючи біологічну та фармакологічну активність, здійснюють протиракову, антимікробну, противірусну, імуномодулюючу, седативну та болезаспокійливу, протилейкозну дії на організм людини (Sun & Liu, 2011).

Повідомляється про виявлення вторинних метаболітів у *E. helioscopia* L., зокрема дитерпеноїдів, флавоноїдів, поліфенолів, стероїдів та ліпідів. Екстракти етилацетату рослин *E. helioscopia* із високим вмістом флавоноїдів (кверцетин, мірицетин і кемпферол) продемонстрували значний антипроліферативний потенціал проти різних типів раку людини. Висунуто припущення, що це відбувається саме завдяки флавоноїдам (рис. 2-B) (Wang et al., 2011; Огієнко, 2023).

Дитерпеноїди латексу *E. poissonii* Pax показали сильну цитотоксичу селективність для лінії клітин карциноми нирки людини, що перевищує ефективність протипухлинного антибіотику адріаміцину у 10 000 разів (рис. 2-C) (Özbilgin & Saltan Citoğlu, 2012). Латирани, виділені з *E. nivulia* Buch.-Ham., здійснюють значну цитотоксичну активність щодо клітинних ліній колатерального раку, раку молочної залози та інших видів раку (рис. 2-D) (Shi et al., 2008).

В умовах *in vitro* у *E. ebracteolata* Hayata виявлено властивості пригнічення проліферації В-лімфоцитів, які здійснюють специфічну гуморальну імунну відповідь (Özbilgin & Saltan Citoğlu, 2012). Повідомляється про виявлений в *in vitro* протипухлинний ефект *E. hirsuta* L. (syn. *E. pubescens* Vahl), що проявлявся в помірному інгібуванні клітинних ліній пухлин людини, які спричиняють аденокарциному молочної залози, недрібноклітинний рак легенів та рак ЦНС (Valente et al., 2004).

E. jolkinii Boiss. – це лікарська рослина, яка використовується для лікування ревматизму, цирозу печінки, оперізувального лишаю та є дієвим засобом для пригнічування росту пухлин. Відзначається потужний протипухлинний ефект, що проявляється в зупинці клітинного циклу, апоптозу лейкозу ракових клітин. *E. tirucalli* використовували для отримання метанольних екстрактів, які ефективні проти багатьох типів ракових клітин (Aleksandrov et al., 2019).

На сьогодні тривають медичні клінічні випробування лікарських препаратів на основі рослинної сировини *Euphorbiaceae*. Зокрема, сік *E. peplus* L. тестується для місцевого застосування під час лікування карцином та поверхневих уражень шкіри. Діючою речовиною *E. peplus* є інгенол мебутат із торговельною назвою Picato (Ramsay et al., 2011). Проте, у 2020 р. Європейська комісія відкликала дозвіл на продаж Picato у країнах Євросоюзу, мотивуючи можливим ризиком раку шкіри та іншими побічними ефектами (Picato, 2020).

Повідомляється про проліфераційну активність екстракту рослин *E. lunulata* Bunge (syn. *E. esula* subsp. *esula*) на інсуліно- та інтерлейкіно-10 залежні клітинні лінії. А виділені кверцетини та галова кислота екстракту *E. lunulata* показали найсильнішу ІЛ-10 активність, що підтверджує доцільність його використання як рослинного засобу для лікування бронхіальної астми (Nishimura et al., 2005).

Розроблено технологію зеленого синтезу, завдяки якій синтезовано наночастинки

внаслідок поєднання нітрату срібла $AgNO_3$ з екстрактом свіжих листків молочаю зонтичного *Euphorbia umbellata* (Pax) Bruyns. Результати тестування показали суттєву активність цих наночастинок проти патогенів, які спричиняють захворювання рослин, включно з нематодами, грибами, бактеріями, серед яких збудник захворювання раку цитрусових рослин *Xantomonas citri*, деякі види мікоплазм та бактерії ссавців *Escherichia coli*, *Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp., у деяких випадках перевищуючи дію антибіотиків, зокрема пеніциліну, ванкоміцину, еритроміцину (Kumar et al., 2019).

На численних тестових моделях, зокрема на щурах та мишах продемонстровано дозозалежну протизапальну та антиартритну дію водорозчинної фракції латексу *E. royleana* Boiss. (Bani et al., 2000).

Жарознижуюча та анальгетична активність виявлена завдяки сполуці мірсінану, виділеній із рослинного хлороформного екстракту *E. decipiens* Boiss. & Buhse, яка за умови введення мишам у дозі 5–20 мг/кг, що відповідає 100 мг/кг аспірину або ібупрофену, здійснювала значну анальгетичну дію (Ahmad et al., 2005). Резиніфератоксин, надпотужний аналог капсаїцину, присутній у латексі *E. resinifera*, знімає запалення нервової системи та послаблює нейропатичний біль, сприяючи покращенню сприйняття болю (Shi et al., 2008).

Простатин, отриманий із *E. fischeriana*, показав суттєву анальгетичну та седативну дію (Ma et al., 1997). А фракція етилацетату латексу *E. royleana* показала дозозалежний периферичний анальгетичний ефект та жарознижуючу дію (Shi et al., 2008). У традиційній медицині етилацетатний екстракт кореня *E. heterophylla* використовується для заспокоєння болю.

Відомо, що вільні радикали мають сильний вплив на здоров'я людини, спричиняючи оксидативний стрес, який прискорює старіння організму, спричиняє проблеми з пам'яттю, розвиток хронічних захворювань, зокрема атеросклероз, хворобу Альцгеймера, рак, зниження імунітету та запальні процеси (Choudhary & Tandon, 2009). Ці вільні радикали утворюються в організмі під час обміну речовин внаслідок зовнішніх та внутрішніх чинників. Ефективно протистояти вільним радикалам допомагають екзогенно вжиті натуральні антиоксиданти. Важливим науковим завданням на сьогодні є пошук нових джерел безпечних та недорогих антиоксидантів.

Результати досліджень свідчать, що молочай *E. hirta* має потужний антиоксидативний потенціал. Найактивнішим виявився екстракт листків, що становить 72,96%, дещо нижчий – квітів, коріння та стебла, поглинаюча активність яких становить 52,45%, 48,59%, 44,42% відповідно за стандартним показником 75,13%.

Фітохімічний скринінг екстракту листків *E. hirta* виявив наявність компонентів із відновлювальною дією (подібною до аскорбінової кислоти): цукрів, терпеноїдів, алкалоїдів, стероїдів, дубильних речовин, флавоноїдів та фенольних сполук. Подальші дослідження необхідні для виділення та характеристики активних антиоксидантів, які можна використовувати для лікування захворювань, пов'язаних з окислювальним стресом (Basma et al., 2011).

Дослідження антиоксидантної активності екстрактів *E. heyneana* Spreng., *E. acanthothamnos* Heldr. & Sartori ex Boiss., *E. macroclada* Boiss. і *E. rigida* M. Bieb. виявили, що етанольний екстракт *E. acanthothamnos* із високим вмістом поліфенольних сполук має найвищу антиоксидантну активність на рівні стандартного показника α-токоферолу (вітамін Е). Ацетоновий екстракт *E. macroclada* продемонстрував найвищий вміст флавоноїдів та вищу антиоксидантну активність у порівнянні із α-токоферолом (Barla-Demirkoz et al., 2007).

Отже, вміст фенольних сполук призводить до підвищення антиоксидантної активності екстрактів та відіграє важливу роль у стабілізації перекисного окиснення ліпідів (Barla-Demirkoz et al., 2007). Проте в метанольному екстракті *E. petiolata* Banks & Sol. найактивнішими сполуками є флавоноїди кемпферол, кверцетин та похідні міріцетину (Nazemiyeh et al., 2010). Тому, для досліджень антиоксидантної активності рослин *Euphorbiaceae* відкриваються великі перспективи та необхідність вивчення якісного складника екстрактів, щоб зрозуміти, які класи сполук відповідають за антиоксидантну активність.

Етанольні екстракти надземної маси рослин *E. hirta* проявляють широкий спектр протимікробної дії проти бактерій, які спричиняють важкі захворювання людини: *Escherichia coli*, *Pseudomonas vulgaris*, *P. aeruginosa* та *Staphylococcus aureus*. Похідні гідроксипроліну, виділені з *E. paralias* L., здійснили помірну противірусну активність проти ВІЛ-1 інфекції. Латекс *E. characias* L. продемонстрував протигрибкову актив-

ність проти інфекції *Candida albicans* (Mali Prashant & Panchal Shital, 2017).

Неочищений розчин сапонінів стебла молочаю *E. neriifolia* у концентрації вище 10 мг/мл проявив потужну антимікробну активність, яка цілком ідентична дії стандартних антибактеріальних лікарських препаратів, проти кишкової палички *Escherichia* coli, синьогнійної палички *Pseudomonas* aeruginosa та стафілококу золотистого Staphylococcus aureus, грибка кандиди біліючої Candida albicans. Крім того, екстракт *E. neriifolia* здійснює суттєву ранозагоювальну дію та виражену знеболювальну активність, яку можна порівняти з диклофенаком натрію (Mali Prashant & Panchal Shital, 2017).

Встановлено дію *E. helioscopia* проти *Bacillus cereus* – ґрунтової грам-позитивної бактерії, яка спричиняє тяжкі токсикоінфекції у людини у разі недотримання умов зберігання та приготування продуктів харчування. Механізм дії полягає в тому, що поліфенольні сполуки, зокрема полісахариди, лігніни та флавоноїди, зв'язуються з білковою оболонкою і таким способом припиняють поглинання вірусу (Ramezani et al., 2008).

Виявлено синергетичну дію із протигрибковими засобами щодо штаму *Candida tropicalis* в екстрактів надземної частини представників місцевої флори України: молочаю мигдалевидного *Euphorbia amygdaloides* L. та молочаю городнього (садового) *E. peplus* L., надземної частини і особливо коренів молочаю гострого *E. esula* L., значно слабше – у молочаю соняшного *E. helioscopia* L. та молочаю кипарисовидного *E. cyparissias* L. Тому, ці молочаї флори України потрібно розглядати як перспективні засоби в антифунгальній клінічній практиці, зокрема, в стоматології (Огієнко, 2023).

Сухий екстракт рослин *E. prostrata* Aiton ефективний для лікування геморою завдяки вмісту в ньому флавоноїдів, фенольних сполук і фенолкарбонових кислот, покращує загальний стан упродовж перших 3 днів, а через 14 днів викликає максимальне покращення (Bakhshi et al., 2008; Özbilgin & Saltan Citoğlu, 2012).

Mallotus oppositifolius (Geiseler) Müll. Arg. – кущ родини молочайних з Африки та Мадагаскару, використовується в трав'яних сумішах у народній медицині. Екстракти *M. oppositifolius* містять алкалоїди, серцеві глікозиди та фенольні сполуки, концентрація яких вища в листках, ніж у коренях. А метанольний та етанольний екстракти коренів мають антиоксидантну та протизапальну дію, чому сприяє наявність фенольних сполук, зокрема, флавоноїдів (Nafiu et al., 2013).

Cnidoscolus aconitifolius (Mill.) I.M. Johnst. – посухостійкий деревовидний шпинат або шпинатне дерево 3–5 м заввишки із західних частин Нігерії (рис. 3-А). Екстракти рослин містять алкалоїди, сапоніни, фенольні, дубильні речовини, флавоноїди, антрахінони, флобатаніни і тритерпени. Практично з'ясовано, що екстракт *C. aconitifolius* може погіршувати фертильність та запліднення у дослідних тварин (Toyin et al., 2014).

Aleurites moluccanus (L.) Willd. (тунг молукккський, лумбанга) – дерево походженням із тропічних районів Індо-Малайзії, вид культивувався в багатьох

A B C

Рис. 3. A – *Cnidoscolus aconitifolius* subsp. *aconitifolius* (Dias Dileep, 2021); B – Aleurites moluccanus, фото Haruni Krisnawati (Krisnawati, 2011); C – E. tirucalli у колекції Ботанічного саду м. Мейзе, Бельгія (фото автора Н. Левчик)

*тропічних країнах, де й натуралізувався (рис. 3-В). В засобах масової інформації горіхи дуже наполегливо рекламують та пропонують для схуднення без наукових доказів їх терапевтичної ефективності та безпечності. Тому, потенційно можуть бути небезпечними, спричиняючи серйозні проблеми зі здоров'ям та смерть (переважно в жінок) (*González-Stuart & Rivera, 2019).

Монотерпени з листків *Croton cajucara Benth. та* біологічно-активні сполуки (12-О-тетрадеканоїлфорбол-13 ацетат, дитерпени ятрофон і ятрогроссидіон), отримані із видів родини *Euphorbiaceae* (*Jatropha grossidentata* Pax & K. Hoffm. та *Jatropha isabellei* Müll.Arg)., мають лейшманіцидну дію проти збудників *Leishmania chagasi, L. amazonensis, L. braziliensis,* які спричиняють трансмісивне смертельне захворювання та поширюються через укуси москітів переважно в тропіках та субтропіках (Gouri et al., 2021).

Різностороннє дослідження та медичне використання рослин *Euphorbiaceae* має давню історію, традиції, тисячолітній практичний досвід застосування в народній медицині багатьох країн світу. Сьогодні процес дослідження лікарських та отруйних властивостей рослин *Euphorbiaceae* відбувається на сучасному обладнанні із застосуванням новітніх технологій, базується на досягненнях науки на фоні ретельних досліджень та чисельних випробувань із метою розширення спектру використання цих рослин у офіційній медицині, фармакогнозії та фармакології.

Унаслідок токсичності рослин, здатності спричиняти отруєння, опіки, запалення шкіри та слизових оболонок, їхнє використання вимагає продуманого та уважного індивідуального підходу. Крім того, рослини є загрозою для худоби, а окремі види молочаю здійснюють суттєвий алелопатичний вплив з ознаками інвазивності на важливі сільськогосподарські рослини та представників природної флори (Rizk, 1987).

Стрімке зменшення запасів природних енергоресурсів у світовому масштабі та забруднення довкілля, як наслідок їхнього використання, призвели людство до необхідності пошуку альтернативних джерел біопалива. Біопаливо має низку переваг: високу теплоємність, низьку зольність, багате на аліфатичні вуглеводні та може бути порівняне із нафтою. Рослини родини *Euphorbiaceae* виявились надзвичайно ефективними, невибагливими та перспективними джерелами біопалива (Patan et al., 2021).

Біопаливо (біодизель та біоетанол) із рослин *Euphorbiaceae* – це прекрасна відновлювана альтернатива викопному паливу, яке отримують із різноманітної рослинної сировини з використанням сучасних технологій. Проте, є протиріччя та конфлікт «їжа проти палива» внаслідок конкуренції між харчовими та паливними рослинами за родючі землі та водопостачання, крім того, є загроза голоду в результаті використання продовольчих культур для біодизеля.

У цій ситуації рослини *Euphorbiaceae* мають суттєві переваги, завдяки яким вони не створюють конкуренції сортовим аграрним культурам. До цих переваг належать здатність рослин до високого рівня продуктивності в посушливих умовах на маргінальних територіях. Крім того, біопаливо рослин цієї родини за хімічними, фізичними та горючими властивостями відповідає властивостям та вимогам викопного палива або перевершує їх (Patan et al., 2021).

Рослини *E. tirucalli* є яскравим представником родини, альтернативним надзвичайно перспективним джерелом енергії та виробництва рідкого біопалива, оскільки вони мають швидкий приріст надземної маси на маргінальних територіях з обмеженим водопостачанням, *непридатних для вирощування інших культур,* тому не створюють конкуренції культурним рослинам (рис. 3-С) (Mwine, 2011).

Крім того, *E. tirucalli* рекомендовано комерційним проєктам із виробництва паливної деревини для відновлення лісів у напівзасушливих районах Кенії (Mwine, 2011).

Активні дослідження в 1970-х – на початку 1980-х рр. та робота із впровадження *E. tirucalli* як джерела енергії були проведені Duke A. James у 1983 р. та Calvin M. У 1982 р. (Nchimbi, 2021). Дослідники повідомили, що латекс *E. tirucalli* складається з нафтоподібних вуглеводнів, переважно тритерпеноїдів C_{30}, який за умови проведення крекінгу дає високооктановий бензин утричі дешевший, ніж звичайна сира нафта (Mwine, 2011).

Виявлено, що кора стебел *E. tirucalli* має значно вищий вміст вуглеводнів (>17%), ніж більшість видів широколистяних рослин, що робить цей вид більш ефективним джерелом енергії (Nchimbi, 2021). Підраховано лабораторним методом, що вуглеводень латексу *E. tirucalli* міг би виробляти еквівалент 15 (в

діапазоні від 10 до 50) барелів нафти на акр або 37 барелів на гектар. Крім того, латекс містить велику кількість стеролів і тритерпенів, які необхідні для отримання біопалива. Хроматографічні тестування показали стероїдний, тритерпеноїдний та дитерпеноїдний вміст *E. tirucalli (*Uchida et al., *2010). Проміжним продуктом синтезу стеролів та терпеноїдів у мевалонатному шляху E. tirucalli є сквален.*

Повідомляється про ряд чинників (клімат, сезонні коливання та етапи онтогенезу), що впливають на урожайність олії рослин Euphorbiaceae. Крім того, спостерігається видова особливість накопичення більшої кількості олії в тих чи інших органах.

Виявлено також, що товщина стебла та сухість клімату суттєво впливають на процес синтезу олії. Так, у рослин E. tirucalli з великим (80 см) обхватом стебла у напівпосушливих районах Танзанії вихід олії становить 16,47±0,34%, а найнижчу кількість олії, 4,17±0,01%, отримано з рослин із малим (20 см) обхватом стебла, які зростають на південних високогірних районах берегової зони країни. Зазвичай на ділянках із напівпосушливим кліматом урожайність *E. tirucalli* суттєво вища, ніж на прибережних ділянках та тропічних територіях (Nchimbi, 2021).

Композиція олій *E. tirucalli* – це суміш летких та натуральних органічних речовин, зосереджених у вегетативних органах (стеблах та філокладіях). Олію можна видобути за допомогою дистиляції, віджиму або екстракції розчинником. Олія цього молочаю широко використовувалася в стародавньому Римі, Греції, Єгипті та на Близькому Сході як парфуми, ароматизатори, дезодоранти, антисептики та фармацевтичні препарати (Nchimbi, 2021).

Молочай *E. lathyris* – посухостійкий вид, названий другим найкращим видом, який може зростати на непридатних для харчових культур територіях, містить до 10% відновлених вуглеводнів, запропонований для виробництва олії з низьким вмістом ізопрену (Calvin, 1982; Rizk, 1987). Суміш вуглеводнів складається в основному з ізопренів із відкритим ланцюгом та циклічних терпеноїдів. За даними Calvin M. (1982) 95% олії *E. lathyris* можна розділити на корисні продукти, що робить його дуже цінною нафтохімічною сировиною, з якої можна виробляти сам бензин. За оцінками науковців урожайність *E. tirucalli* та *E. lathyris* становить понад 10 барелів олії/акр/рік і важливо, що на напівпосушливих територіях та без генетичних чи агрономічних покращень рослин (Calvin, 1982; Rizk, 1987).

Рослини *E. caducifolia* Haines, що зростають у Індії та Пакистані, також можна використовувати як замінник біопалива, джерело хімічної сировини та біоетанолу. Особливо важливо те, що *E. caducifolia* зростає в посушливих та напівпосушливих регіонах і дає латекс без аграрнотехнічних заходів та родючих ґрунтів (рис. 4-А) (Patan, 2021).

Початок використання латексу датовано початком XX ст. Латекс рослин надзвичайно цінний, оскільки використовується в комерційно важливих виробах, таких як фарби та сирий натуральний каучук (Rizk, 1987; Dabholkar et al., 1991).

Кілька важливих каучуконосних рослин належать саме до родини *Euphorbiaceae*. Зокрема, *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Müll.Arg. є основним джерелом виробленого каучуку у світовому масштабі (рис. 4-В). Із рослин гевеї бразильської та інших видів *Hevea* виготовляють еластик, каучук або так званий індійський каучук (Rizk, 1987).

Велику увагу виробників каучуку привертає латекс рослин *E. tirucalli*, який містить від 2,8% до 8,3% каучуку та від 50,4% до 82,1% смоли, а також багатий на терпеноїди, стерини та вуглеводні, надзвичайно схожі на компоненти нафти, які за умови змішування йдуть на виробництво біопалива (Zhang, 2019), а вуглеводневі полімери E. tirucalli є джерелом виробництва замінників каучуку (Mwine et al., 2013).

Каучук *E. tirucalli* являє собою суміш кетонів із довгим лагцюгом і цис-1,4 поліізопрену, який погано розчиняється в гарячому спирті. Крім того, латекс рослини містить смолу, яка перешкоджає його тривалій стабільності (Hastilestari et al., 2013). Тому латекс *E. tirucalli* за якісними показниками поступається місцем *Hevea brasiliensis,* проте він є перспективним для досліджень та ефективного використання, як природного полімеру.

Ефективність виробництва суттєво відрізняється залежно від генотипу рослин *E. tirucalli*. Найбільшу кількість каучуку зі свіжої маси (10,74 мг/г) отримано із генотипу рослин із Республіки Сенегал, дещо нижче (8,80 мг/г) – із генотипу рослин зі США, найменше (1,42 мг/г) – із генотипу рослин із держави на заході Африки – Республіки Того (Hastilestari et al., 2013).

A B C

Рис. 4. Види *Euphorbiaceae* промислового значення: A – *E. caducifolia*, фото Kk Agrawal (The Encyclopedia of Succulents…); B – *Hevea brasiliensis* (Valentine floral creations…); C – *E. intisy* Drake в колекції Ботанічного саду університету в м. Палермо, Італія (фото M. Sajeva) (Poma et al., 2021)

Сильні фіксуючі властивості смоли E. tirucalli застосовували здавна в побуті на східноафриканському узбережжі для виробництва жувальної гумки, для кріплення лез ножів до дерев'яних ручок та наконечників списів до древка (Mwine et al., 2013).

Отже, *E. tirucalli* належить до посухостійких технічних рослин і завдяки унікальній комбінації фотосинтетичних шляхів C_3 та CAM-типів є джерелом фітонутрієнтів, каучуку та біопалива (Hastilestari et al., 2013).

До представників *Euphorbiaceae*, з яких одержують каучук, відносяться також: *M*anihot carthagenensis subsp. glaziovii (Mü ll.Arg.) Allem (syn. *Manihot glaziovii* Müll.Arg.) – родом із Бразилії, Колумбії, Венесуели, види роду *Micrandra* Benth. (Бразилія, Венесуела, Перу, Еквадор, Колумбія) та видів роду *Cnidoscolus* Pohl. (Північна та Південна Америка, включно із Вест-Індією), а також ендемік о. Мадагаскар *E. intisy* Drake (рис. 4-C) (Rizk, 1987).

Численні види *Euphorbia* вже дають урожай сировини, або про них повідомляється, як про потенційне джерело каучуку: *E. myrsinites* L., *E. rigida* M.Bieb., *E. macroclada* Boiss., *E. seguieriana* Neck., *E. stricta* L., *E. agraria* M. Bieb., *E. smirnovii* Geltman, *E. falcata* L. subsp. *falcata* var. *falcata*, *E. heteradena* Jaub. & Spach., *E. nicaeensis* All. subsp. *lasiocarpa* Boiss, *E. coniosperma* Boiss. & Buhse (Özbilgin & Saltan Citoğlu, 2012).

Латекс відрізняється за якістю залежно від видового походження. Наприклад, латекс *E. caducifolia* Haines дає якісніший природний каучук, ніж *Calotropis procera* (Aiton) W.T.Aiton. На якість впливає відсоток вмісту каучуку та може мати такі показники: *E. abyssinica* J.F. Gmel. – 16,7%, *E. candelabrum* Welw. – 20%, *E. dregeana* E. Mey. ex Boiss. – 17,6% та *E. mauritanica* L. – 15,81% (Rizk, 1987).

На вміст та якість латексу *Euphorbiaceae* суттєво впливає також тип ґрунту. Червоний гравійний ґрунт пустирищ надає можливість збирати максимальний урожай та покращує вміст латексу в перспективних біопаливних рослин, зокрема у *E. antisyphilitica* Zucc. (Johari & Kumar, 2013).

Ще однією перспективною культурою для виробництва біодизелю є *Jatropha curcas* L. (рис. 5-A). Побічні продукти видобутку олії ятрофи куркас успішно використовують для виробництва целюлозного етанолу, сприяючи у такий спосіб задоволенню виробничих потреб у спирті (Abdelgadir et al., 2012).

Широкого практичного використання набула рицинова олія із насіння рицини звичайної *Ricinus communis* (рис. 5-B) (вихід до 54%), яка містить 1,0% токоферолу, 21,6% нестерольної фракції неомилюваних речовин та 0,9% рицинової олії. Основним компонентом олії є рицинолеїн – гліцериновий ефір рицинолевої кислоти (Rizk, 1987).

Рицинова олія знайшла широкий спектр промислового застосування. Крім широковідомого фармацевтичного засобу, вона використовується в лакофарбовій і текстильній промисловостях, є компонентом мастила та гальмівної рідини, мила та чорнил, пластмас та відбілювачів. Олія є водостійкою і тому

A B C

Рис. 5. Рослини *Euphorbiaceae* в колекції Ботанічного саду м. Мейзе, Бельгія: A – *Jatropha curcas* L.; B – *Ricinus communis;* C – *Manihot esculenta* (фото Н. Левчик)

активно використовується для захисного покриття тканин, літаків, ізоляції, харчових контейнерів, гуми (Rizk, 1987).

Тунгова олія або олія китайського дерева, є нелеткою олією тунга китайського *Vernicia fordii* (Hemsl.) Airy Shaw (syn. *Aleurites fordii* Hemsl.) та китайського олійного дерева *Vernicia montana* Lour. (syn. *Aleurites montanus* (Lour.) E.H.Wilson), не вживається в їжу, але є розчинником для фарб та лаків, який швидко висихає. Олія належить до хороших консервантів та дуже стійка до атмосферних впливів і тому має широкий спектр промислового застосування.

Олія свічкового горіха або лумбангова олія отримується зі шкаралупи насіння та коріння *Aleurites moluccanus* (L.) Willd. Використовується для захисту корпусів суден (Rizk, 1987). Насіння рослин *Mallotus nudiflorus* (L.) Kulju & Welzen (syn. *Trevia nudiflora* L.) містить олію, яка за вмістом та властивостями подібна до тунгової олії.

Маніок їстівний або касава *Manihot esculenta* Crantz (рис. 5-C) – поруч із солодкою картоплею є найважливішим тропічним коренеплодом та основною їжею для мільйонів людей Африки, Індії та Бразилії. Поживні бульбоподібні корені містять 77,5–88,5% крохмалю, цукор, нітрогенові сполуки, жирні олії, достатньо вітаміну C та кальцію, проте менш ніж 1,0% білку, отруйний глікозид, який руйнується під час термічної обробки, тому в їжу вживають вареними або печеними. Хліб із маніоком має високу харчову цінність та замінює пшеничний хліб у харчуванні. Промислово з коренів маніока їстівного отримують борошно, крохмаль, крупу тапіоку, спирт та ацетон (Kuete, 2014; Rizk, 1987).

Вторинні метаболіти рослин *Euphorbiaceae* корисні та перспективні для консервування продуктів у харчовій промисловості. Так званий канделільський віск, який був знайдений у Північній Мексиці та на південному заході США, отриманий із суміші листків деяких видів молочаю, серед яких *E. antisyfilitica*, був визнаним харчовою добавкою E902 з гелеутворюючими властивостями. Він дозволений для глазурування кондитерських виробів, горіхів, вафель, кавових зерен, дієтичних добавок та свіжих фруктів (Scientific opinion, 2012; Salehi et al., 2019).

Результати біохімічного аналізу рослин *E. graminea* Jacq., походженням із Південної Мексики, свідчать про те, що листки є хорошим перспективним джерелом первинних метаболітів: вуглеводів – 17,86±0,08%, білків – 65,34±0,04% та невеликої кількості жирів – 0,32±0,05%, що надає можливість включати рослини в дієтичне харчування людини, а низький вміст вологи запобігає розвитку мікроорганізмів та псуванню листків (Bolaji, 2019).

Можливе широке застосування свіжих рослин *Euphorbiaceae* у харчовій промисловості. Зокрема, висушена кора рослин *Croton eluteria* (L.) W.Wright, які зростають на Багамських о-вах та на Кубі, містить 1–3% ефірної олії у вигляді суміші терпенів та дитерпенів, смолу, ванілін, танін та лігнін,

використовується як пряно-ароматичний засіб. Як гіркота додається в лікери, вермути, кампарі, як гіркий шлунковий засіб та для ароматизації тютюну (Rizk, 1987).

Листки *Cnidoscolus urens* (L.) Janti (syn. *Cnidoscolus marcgravii* Pohl) – трав'янистої рослини з тропічної Америки місцеві жителі використовують в їжу на о. Юкатан, а олію з горіхів – для її приготування (рис. 6-А) (Rizk, 1987).

Біохімічний вміст, лікувальні та антиоксидантні властивості меду двох видів *E. resinifera* O.Berg. (рис. 6-В) та *E. officinarum* L. різних регіонів Марокко встановлено завдяки наявності дев'яти хімічних елементів: Fe, Zn, Mn, Cu, Al, Ca, K, Mg, Na. Підвищений вміст заліза, міді та алюмінію в складі меду *E. officinarum* може свідчити про забруднення довкілля або неналежне зберігання зразків меду. Зразок *E. officinarum* завдяки більшому вмісту загальних фенолів показав кращу здатність поглинати вільні радикали порівняно з медом *E. resinifera*.

Виявлено, що водні екстракти меду в умовах *in vitro* мають вищі показники активності, порівнюючи із відповідними зразками меду. Завдяки своєму біохімічному вмісту та властивостям мед молочаю є рекомендованим для лікування симптомів подагри, гіперпігментації, хвороби Альцегеймера або затримання процесу прогресування цих захворювань (Boutoub et al., 2021).

Відомо, що із деревних рослин родини молочайних виготовляють меблі та застосовують їх на будівельних роботах. Наприклад, дерево-пісочниця *Hura crepitans* L. (рис. 7-А, В) дає деревину, придатну для виготовлення меблів, *Ricinodendron heudelotii* subsp. *africanum* (рис. 7-С) *(syn. Ricinodendron africanum* Müll.Arg.) є джерелом цінних сортів деревини (Rizk, 1987).

Із рослинної сировини *Euphorbiaceae* є можливість отримувати целюлозу та папір. Наприклад, рослини *Hura crepitans*, *Macaranga tanarius* (L.) Müll.Arg., Ricinodendron heudelotii (Baill.) Heckel та Triadica sebifera (L.) Small (syn. *Sapium sebiferum* (L.) Dum.Cours.); *Ricinus communis* дають волокно, яке із домішком бамбукової целюлози йде на виготовлення паперу найвищої якості. А слиз рослин роду маніок *Manihot* Mill. використовують для виготовлення паперу (Rizk, 1987).

У минулому в країнах Африки рослини родів *Euphorbia* L. та *Hippomane* L. (*Hippomane mancinella* L., манцинелла) були біологічною зброєю, зокрема отрутою для стріл під час полювання на великих хижих тварин. Отруйними властивостями рослин із давніх часів користувались також і племінні народи та жителі Індії під час рибної ловлі. Вони розкидали квітки, кору, листки і навіть насіння *E. tirucalli*, спричинюючи одурманювання риби. Внаслідок чого риба піднімалась на поверхню води та ставала легкою здобиччю для рибалок (Tiwari & Singh, 2006).

А

В

Рис. 6. А – *Cnidoscolus urens L.* колекції Королівських ботанічних садів, К'ю, фото William Milliken (Royal Botanic Gardens, Kew…); В – *E. resinifera* O.Berg. колекції Ботанічного саду імені акад. Олекс. Фоміна (фото Н. Левчик)

A B C

Рис. 7. A, B – *Hura crepitans* L. колекції Ботанічного саду м. Мейзе Бельгія, фото *Mamdy G.* (Meise Botanic Garden…)
C – *Ricinodendron africanum* в Конго, фото Jos Stevens (West African Plants…)

Водні екстракти *E. tirucalli* спричиняють справжнє біохімічне отруєння організму прісноводного змієголова плямистого *Channa punctatus* (Bloch), викликаючи енергетичний, обмінний колапс, зниження активності ферментів печінки та м'язів риб (Tiwari & Singh, 2006).

І сьогодні продовжують використовувати латекс Vernicia montana Lour. (syn. *Aleurites montanus* (Lour.) E.H.Wilson), Croton reflexifolius Kunth (syn. *Croton sylvaticus* Schltdl.), Euphorbia drupifera Thonn. (syn. *Elaeophorbia drupifera* (Thonn.) Stapf), та ін. для отрути риби (Rizk, 1987). Макуху рослин видів роду *Aleurites* J.R.Forst. & G.Forst. після видалення олії використовують на добриво, але її не можна використовувати на корм для тварин (Rizk, 1987).

Дитерпеноїди рослин *E. paralias* L. здійснюють суттєву молюскоцидну отруйну дію проти равликів *Biomphalaria alexandrina*. Латексні екстракти рослин *E. pulcherrima* Willd. ex Klotzsch та *E. hirta* також мають потужну молюскоцидну активність та є дієвими засобами захисту від комах (Özbilgin & Saltan Citoğlu, 2012).

Латекс рослин *E. tirucalli* є ефективним засобом проти тих молюсків *Biomphalaria gabrata,* які є головним проміжним хазяїном трематоди Schistosoma *mansoni* та переносником тяжкого захворювання людини кишкового шистосомозу в Америці (Mwine et al., 2013).

Водний розчин *E. tirucalli* у концентрації 0,3 г/л упродовж 2–7 діб руйнує та призводить до загибелі 100% осіб *Lymnaea natalensis* – прісноводного равлика, який є проміжним господарем переносника збудника фасціольозу в Нігерії та багатьох інших видів африканських трематод (Opeyemi et al., 2023). Проте ефективність 0,3–0,5 г/л розчину *E. tirucalli* на равликів *Bulinus guernei* становить лише 40–65% осіб. На відміну, 0,1–0,2 г/л розчин *Jatropha curcas* менш ніж за 7 діб ефективно отруює 100% осіб як *Lymnaea natalensis,* так і *Bulinus guern*ei (Vassiliades, 1984).

Завдяки рослинам родини *Euphorbiaceae* сьогодні успішно проводять агролісомеліоративні заходи та здійснюють охорону природи. Внаслідок стійкості до посухи та невибагливості до ґрунту рослини *E. tirucalli* цілком успішно застосовують у напівпосушливих районах для проведення заходів лісорозведення та відновлення лісів із метою збереження та відновлення ґрунту. Такі програми відомі в Танзанії, Кенії, Шрі-Ланці та ін.

Крім того, *E. tirucalli*, стебла якої можуть щільно зростатись і сягати 12 м у висоту, використовують для демаркації кордонів, живої огорожі навколо поселень та краалів, як захист від вітру в напівпосушливих районах, а завдяки токсичності латексу – як захист від тварин (Mwine et al., 2013). Можуть бути використані дещо нижчі за висотою види: *E. kamerunica* Pax, *E. lateriflora* Schumacher & Thonning, *E. bussei* Pax var. kibwezensis (N.E.Br.) S.Carter в країнах Африки, Арабського світу, Далекого Сходу та Південної Америки (Newton, 2024).

Представники *Euphorbiaceae* все частіше стають популярними декоративними рослинами. Їх розміщують у контейнерах в офісах, житлових приміщеннях та на присадибних ділянках. Вони є бажаними серед рослин альпійських гірок, кам'янистих садів та рокаріїв. Популярність та перевагу рослини *Euphorbiaceae* набули

внаслідок своїх біоморфологічних особливостей: посухостійкості, невибагливості, здатності до витримування високої сонячної інсоляції, вічнозеленої та естетичної форми крони. Дуже естетично виглядають рослини як солітери, так і в групових посадках (рис. 8).

Прикладом застосування можуть бути рослини *E. tirucalli*, які внаслідок своєї декоративності завдяки красивим вічнозеленим гілкам від тьмяно-зеленого до червоно-зеленого кольору, що нагадують олівці, є популярними в міжнародній торгівлі рослинами. Збільшений попит на рослини та розширення торгівлі ними призвело до значного поширення в областях, де *E. tirucalli* ніколи не були ендемічними (рис. 8-B) (Mwine et al., 2013).

Обмеженим є використання відомої в Середземноморському басейні, Африці та Індії декоративної рослини *Ricinus communis* внаслідок належності до переліку найотруйніших рослин світу (Kuete, 2014). Проте останнім часом рослини *Euphorbiaceae* набули популярності в озеленінні інтер'єрів, у створенні так званих фітостін (Лугова, 2022). Ці фітостіни отримали назву ботанічних фільтрів та стали популярними не тільки в декоративному та естетичному плані, але й завдяки здатності до фіторемедіації та біофільтрації, покращуючи здоров'я та самопочуття людини (рис. 9) (Montaluisa-Mantilla et al., 2023).

Отже, рослини родини *Euphorbiaceae* мають великий історичний досвід використання та широкий спектр застосування. Проте, їх отруйні властивості та можливі побічні ефекти, а також здебільшого неофіційний шлях застосування, позбавлений

A B C

Рис. 8. A – *Euphorbiaceae* в інтер'єрі житла (Unusual seeds…); B – *E. tirucalli* у декорі присадибної ділянки (ESTY…); C – *Euphorbia amygdaloides* у квітковій композиції відкритого ґрунту Арборетуму Роберта Леноар, Бельгія (фото автора Н. Левчик)

A B

Рис. 9. Приклади ботанічних стін використанням рослин *Euphorbia* A – в Бразилії (Лугова, 2022); B – в м. Аліканте, Іспанія зелена фірма «Urbanarbolismo» (Urbanarbolismo…)

наукового підґрунтя, потребують продовження ретельних наукових досліджень, а фармацевтичні препарати – численних попередніх випробувань.

На сьогоднішній момент недостатньо також проводилася робота з відбору найбільш перспективних видів та селекційне виведення нових сортів цих рослин із підвищеним вмістом вторинних метаболітів. Тому, продовження досліджень агроекологічних, ботанічних, морфолого-анатомічних, біохімічних вважаємо актуальним та необхідним.

Крім того, у зв'язку із перспективою вирощування рослин на території України вважаємо за доцільне розпочати інтродукційні заходи перспективних видів. Важливими будуть дослідження біохімічного вмісту рослин, накопичення мікро- та макронутрієнтів, особливості роботи C_3 та САМ-типу фотосинтезу в нових погодно-кліматичних та ґрунтових умовах України.

Вивчення біохімічного вмісту, динаміки накопичення нутрієнтів, корисних властивостей розширить сфери та ефективність використання рослин *Euphorbiaceae* у майбутньому. Важливою сферою застосування екстрактів та вторинних метаболітів може стати фармацевтика та медицина. Отже, рослини *Euphorbiaceae* мають великі перспективи використання як джерело біопалива, біологічно активних сполук, для декорування і екологічного очищення приміщень та прибудинкових територій, що в комплексі буде сприяти зміцненню здоров'я, підвищенню добробуту та довголіття людей.

Висновки

Завдяки тисячолітнім дослідженням, багатому практичному використанню, культурним традиціям та наявності в місцевій флорі різних країн світу, накопичено великий досвід застосування рослин родини *Euphorbiaceae* у різних сферах життя людини: в неофіційній та офіційній медицинах, фармакології, харчуванні, побуті, промисловості.

Із споживацькою метою рослин *Euphorbiaceae* застосовують коріння, насіння, латекс, деревину та кору стебла, листки та цілі рослини родини *Euphorbiaceae*. Встановлено, що цілющих властивостей рослинам надають вторинні метаболіти, серед яких дитерпеноїди, сесквітерпеноїди, флавоноїди, стероїди.

Завдяки біологічно активним сполукам рослини *Euphorbiaceae* проявляють протиракову, антипрофілеративну, цитотоксичну, протимікробну, протизапальну, актиоксидантну дії та можуть бути застосовані з метою профілактики, лікування та підтримки здоров'я людини.

Рослини *Euphorbiaceae* є токсичними, можуть нанести суттєву шкоду здоров'ю людей та тварин, здійснюють суттєвий алелопачний вплив на важливі сільськогосподарські культури. Тому, вимагають дуже уважного використання, точного дозування та ретельних випробувань.

Олія рослин *Euphorbiaceae* є цінною сировиною для виробництва біопалива, каучуку та фітохімікатів. Виявлено, що на вміст, якість та продуктивність олії та латексу рослин впливає їх видове походження, генотип, тип ґрунту, погодно-кліматичні умови, сезонні коливання, етапи онтогенезу та розмір рослин.

Традиційним є широке використання рослин *Euphorbiaceae* у країнах, де вони є ендеміками, зокрема, у народній медицині, кулінарії, побуті, будівництві, полюванні, захисті від диких тварин, під час природоохоронних та агролісомеліоративних заходів.

Окреслені для України перспективи використання рослин родини *Euphorbiaceae* потребують продовження комплексу агроекологічних, ботанічних, морфолого-анатомічних, фізіологічних, біохімічних досліджень, результати яких нададуть можливості у майбутньому розширити ефективність та сфери їх використання. Доцільним та актуальним вважаємо проведення інтродукційних заходів особливо перспективних видів родини *Euphorbiaceae*.

Список використаної літератури

Гайдаржи М.М. Життєві форми і онтоморфогенез сукулентних рослин: автореферат дисертації доктора біологічних наук: 03.00.05 ботаніка. Київський національний університет імені Тараса Шевченка. Київ, 2009. 40 с.

Капустян В.В., Нікітіна В.В., Гайдаржи М.М. Колекція тропічних та субтропічних рослин ботанічного саду імені акад. О.В. Фоміна КНУ імені Тараса Шевченка. *Інтродукція рослин.* 2004. № 1. С. 27–35.

Лікарські рослини: Енциклопедичний довідник / відп.ред. А.М. Гродзінський. Київ: Видавництво «Українська Енциклопедія» ім. М.П. Бажана. Укр. вироб.-комерц. центр «Олімп», 1992. 544 с.

Лугова О. М., Баданіна В. А. Досвід використання сукулентів при створенні вертикальних садів. *"Modern scientific research: achievements, innovations and development prospects"*: The 14 th International scientific and practical conference (July 17-19, 2022). MDPC Publishing, Berlin, Germany, 2022. С. 22–29.

Нечитайло В.А., Кучерява Л.Ф. Ботаніка. Вищі рослини. Київ: Фітосоціоцентр, 2000. 432 с.

Огієнко Т.Ю. Мікробіологічне обґрунтування нових засобів на основі лікарських рослин для лікування кандидозу ротової порожнини Дис.докт.філосоії: 221-Стоматологія, 22-Охорона здоров'я. Ів.-Франківськ, 2023. 206 с.

Цебржинський О.І., Орлова Л.Д. Токсичні представники родини молочайних (Euphorbiaceae). *Біорізноманіття України в світлі ноосферної концепції академіка В.І. Вернадського*: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції / За загальною редакцією проф. М.В. Гриньової. Полтава: Астрая, 2013. С. 215–219.

Чаговець Р.К., Перцев І.М., Соболєва В.О. Вивчення деяких видів Молочаїв. *Фармацевтичний журнал.* 1967. № 3. С. 64–67.

Abdelgadir H.A., Johnson S.D., J.Van Staden Pollen viability, pollen germination and pollen tube growth in the biofuel seed crop *Jatropha curcas* (*Euphorbiaceae*). *South African Journal of Botany.* 2012. Vol. 79. P. 132–139. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2011.10.005.

Ahmad V.U., Hussain H.B., Bukhari I.A.S., et al. Antinociceptive diterpene from *Euphorbia decipiens*, *Fitoterapia.* 2005. Vol. 76. № 2. P. 230–232. https://doi.org/10.1016/j.fitote.2004.12.014.

Aleksandrov M., Maksimova V., Koleva Gudeva L. Review of the Anticancer and Cytotoxic Activity of some Species from Genus *Euphorbia. Agric. conspec. sci.* 2019. Vol. 84. № 1. P. 1–5.

Bakhshi G.D., Langade D.G., Desai V.S. Prospective, Open label study of *Euphorbia prostrata* extract 100 mg in the treatment of bleeding haemorrhoids, *Bombay Hospital Journal.* 2008. Vol. 50. №4. P. 577–583.

Bani S., Kaul A., Jaggi B.S., Suri K.A., Suri O.P., Sharma O.P. Anti-inflammatory activity of the hydrosoluble fraction of *Euphorbia royleana* latex. *Fitoterapia.* 2000. Vol. 71. № 6. P. 655–662. https://doi.org/10.1016/s0367-326x(00)00225-2.

Barla-Demirkoz A., Öztürk M., Kültür Ş.K., Öksüz S. Screening of antioxidant activity of three *Euphorbia* species from Turkey. *Fitoterapia.* 2007. № 78 (6). P. 423–425. https://doi.org/10.1016/j.fitote.2007.02.021.

Basma A.A., Zakaria Z., Latha L.Y., Sasidharan S. Antioxidant activity and phytochemical screening of the methanol extracts of *Euphorbia hirta* L. *Asian Pac J Trop Med.* 2011. Vol. 4. № 5. P. 386–390. https://doi.org/10.1016/S1995-7645(11)60109-0.

Bolaji A. O., Adeniran I. O., Awotunde A., Akinpelu B.A. Evaluation of Chemical Composition, Anti-inflammatory, Antioxidant and Cytotoxic Potential of Leaf and Root Extracts of *Euphorbia graminae. Tropical Journal of Natural Product Research.* 2019. Vol. 3. № 6. P. 201–209. https://doi.org/10.26538/tjnpr/v3i6.4.

Boutoub O., El-Guendouz S., Estevinho L.M., Paula V.B., et al. Antioxidant activity and enzyme inhibitory potential of *Euphorbia resinifera* and *E. officinarum* honeys from Morocco and plant aqueous extracts. *Environmental Science and Pollution Research.* 2021. Vol. 28. P. 503–517. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10489-6.

Calvin M. Energy agriculture. Presented at the *Symposium on Controversial Topics in Agricultural and Food Chemistry* (12-17 Sept. 1982). American Chemical Society, Kansas City, Mo, U.S.A., 1982. P. 1–46. [Електронний ресурс]. URL: https://escholarship.org/uc/item/9790c7gt (дата звернення 16.10.2024).

Choudhary R., Tandon R.V. Consumption of functional food and our health concerns. *Pakistan Journal of Physiology.* 2009. Vol. 5. № 1. P. 73–86. https://doi.org/10.69656/pjp.v5i1.713.

Dabholkar D.A., Kaicker P.K., Diwan R.K. Euphorbia latex-Its chemistry and industrial applications: Part 1. *Research and Industry.* 1991. Vol. 36. № 2. P. 126–131.

Dias Dileep E., Sarathlal P.S., Ajith Babu T.K. Ayishath Shabna Cnidoscolus Aconitifolius – An Overview. *International Journal of Research and Scientific Innovation (IJRSI).* 2021. Vol. 8, № 7. P. 22–24. https://doi.org/10.51244/IJRSI.2021.8703.

ESTY. Official website of the company [Електронний ресурс]. URL: https://www.etsy.com/fr/listing/717596633/boutures-de-cactus-crayon-euphorbia (дата звернення 16.10.2024).

González-Stuart A.E., Rivera J.O. Chapter 14-Herbal Weight Loss Supplements: From Dubious Efficacy to Direct Toxicity. *Dietary Interventions in Liver Disease* (*Foods, Nutrients, and Dietary*

Supplements): book/ edited by Ronald Ross Watson and Victor R. Preedy. Academic Press, 2019. P. 175–181. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814466-4.00014-8.

Gouri V., Pandey S.C., Joshi D., Pande V., Upreti S., Samant M. Chapter 8 – Natural products as a novel source for antileishmanial drug development. *Pathogenesis, Treatment and Prevention of Leishmaniasis*. 2021. P. 141–159. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822800-5.00011-1.

Hastilestari B.R., Mudersbach M., Tomala F., et al. *Euphorbia tirucalli* L.– Comprehensive Characterization of a Drought Tolerant Plant with a Potential as Biofuel Source. *PlosONE*. 2013. Vol. 8. № 5. e63501. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0063501.

Hempen C.-H., Fischer T. III-Herbs that purge and drain. *A Materia Medica for Chinese Medicine (Plants, minerals and animal products)*: book / C.-H. Hempen, T. Fischer. Churchill Livingstone, Elsevier Ltd, 2009. P. 84–109. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-10094-9.00006-6.

Jian B., Zhang H., Han C., Liu J. Anti-Cancer Activities of Diterpenoids Derived from *Euphorbia fischeriana* Steud. Molecules. 2018. Vol. 23. № 2. 387. P. 1–11. https://doi.org/10.3390/molecules23020387.

Johari S., Kumar A. Improving growth and productivity of Euphorbia antisyphilitica: a biofuel plant for semi-arid regions. *International Journal of Life science & Pharma Research*. 2013. Vol. 3. № 4. P. 20–24.

Krisnawati H., Kallio M., Kanninen M. *Aleurites moluccana* (L.) Willd.: ecology, silviculture and productivity. CIFOR *(Center of International Forestry Research)*, Bogor, Indonesia, 2011. 11 p.

Kuete V. 22 – Physical, Hematological, and Histopathological Signs of Toxicity Induced by African Medicinal Plants. *Toxicological Survey of African Medicinal Plants:book* / edited by Victor Kuete. Elsevier, 2014. P. 635–657. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800018-2.00022-4.

Kumar S.A., Harichandan Priyadarshini S.S., Acharya Prangya Paramita, et al. Green synthesis and biochemical characterization of silver nanoparticles by using *Euphorbia umbellata* leaf extract and analysis of antimicrobial activity against plant Pathogens. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*. 2019. Vol. 08. № 02. P. 59–69. https://doi.org/10.30574/gscbps.2019.8.2.0137.

Vikas Kurhekar J. Chapter 4 – Ancient and modern practices in phytomedicine. *Preparation of Phytopharmaceuticals for the Management of Disorders. The Development of Nutraceuticals and Traditional Medicine:* book / edited by: Chukwuebuka Egbuna, Abhay Prakash Mishra and Megh R. Goyal. Academic Press is an imprint of Elsevier, 2021. P. 55–75. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820284-5.00019-8.

Liu J., Sun Y., Liu L., Yu C. A water-soluble polysaccharide (EFP-AW1) from the alkaline extract of the roots of a traditional Chinese medicine, *Euphorbia fischeriana*: Fravtion and characterization. *Carbohydrate Polymers*. 2012. Vol. 88. № 4. P. 1299–1303. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.02.004.

Ma Q.-G., Liu W.-Z., Wu X.-Y., Zhou T.-X., Qin G.-W. Diterpenoids from *Euphorbia fischeriana*. *Phytochemistry*. 1997. Vol. 44. № 4. P. 663–666. https://doi.org/10.1016/S0031-9422(96)00605-X.

Mali Prashant Y., Panchal Shital S. *Euphorbia neriifolia* L.: Review on botany, ethnomedicinal uses, phytochemistry and biological activities. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*. 2017. Vol. 10. № 5. P. 430–438. https://doi.org/10.1016/j.apjtm.2017.05.003.

Meise Botanic Garden, Meise, Belgium. Official cite [Електронний ресурс]. URL: https://www.plantentuinmeise.be/en (дата звернення 19.10.2024).

Montaluisa-Mantilla M.S., García-Encina P., Lebrero R., Muñoz R. Botanical filters for the abatement of indoor air pollutants. *Chemosphere*. 2023. Vol. 345. 140483. P. 1–15. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140483.

Mwine J.T. Evaluation of Pesticidal Properties of *Euphorbia tirucalli* L. (Euphorbiaceae) against Selected Pests. PhD thesis. Belgium: Ghent University, Faculty of Bioscience Engineering, 2011. 145p.

Mwine J., Van Damme P., Hastilestari B.R., Papenbrock J. *Euphorbia tirucalli* L. (Euphorbiaceae) – The Miracle Tree: Current Status of Knowledge. *African Natural Plant Products*. 2013. Vol. II: *Discoveries and Challenges in Chemistry, Health, and Nutrition*. Chapter 1. P. 3–7. https://doi.org/10.1021/bk-2013-1127.ch001.

Nafiu M.O., Salawu M.O., Kazeem M.I. 21–Antioxidant Activity of African Medicinal Plants. *Medicinal Plant Research in Africa. Pharmacology and Chemistry:* book / ed. Victor Kuete, Elsevier, 2013. P. 787–803. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405927-6.00021-7.

Nazemiyeh H., Kazemi E.M., Zare K., Jodari M., Nahar L., Sarker S.D. Free radical scavengers from the aerial parts of *Euphorbia petiolata*. *Journal of Natural Medicines*. 2010. Vol. 64. P. 187–190. https://doi.org/10.1007/s11418-009-0382-0.

Nchimbi H.Y. Hydrocarbon yields and stability from Euphorbia tirucalli for quality energy use. *Energy Conversion and Management: X.* 2021. Vol. 12. 9 p. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100122.

Newton L.E. *Euphobias* as hedhes. *Euphorbia World.* Vol. 19. № 2. 2024. P. 11–12.

Nishimura T., Wang L.Y., Kusano K., Kitanaka S. Flavonoids that mimic human ligands from the whole plants of *Euphorbia lunulata. Chem Pharm Bull (Tokyo).* 2005. Vol. 53. № 3. P. 305–308. https://doi.org/10.1248/cpb.53.305.

Opeyemi G. Oso, Joseph O. Sunday, Alexander B. Odaibo Temporal modelling of *Lymnaea natalensis* (Krauss, 1848) in tropical aquatic habitats. *Onderstepoort Journal of Veterinary Research.* 2023. Vol. 90. № 1. P. 1–13. https://doi.org/10.4102/ojvr.v90i1.2023.

Özbilgin S., Saltan Citoğlu G. Uses of some *Euphorbia* species in traditional medicine in Turkey and their biological activities. *Turkish Journal of. Pharmaceutical Sciences.* 2012. Vol. 9. № 2. P. 241–256.

Patan Shaik Sha Valli Khan, Rajeswari B., Kumar S.P., Terry R.G. Use of *Euphorbia* sp. (Euphorbiaceae) as biofuel feedstock for semi-arid and arid lands. *Biofuels.* 2021. Vol. 12. № 5. P. 511–521. https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1501637.

Petrovska B.B. Historical review of medicinal plants' usage. *Pharmacognosy Reviews.* 2012. Vol. 6. № 11. P. 1–5. https://doi.org/10.4103/0973-7847.95849.

Pharmacopoeia of the PPRC Plant List. Southern Cross University [Електронний ресурс]. URL: https://www.scu.edu.au/analytical-research-laboratory---arl/herbal-authentication/pharmacopoeial-monographs/pharmacopoeia-of-the-pprc-plant-list/ (дата звернення 11.10.2024).

Picato. Withdrawal of the marketing authorisation in the European Union, 2020 [Електронний ресурс]. URL: https://www.ema.europa.eu/en/documents/public-statement/public-statement-picato-withdrawal-marketing-authorisation-european-union_.pdf (дата звернення 11.10.2024).

Podolski-Renić A. The establishing of resistant cancer cell lines as a model for testing of new chemotherapeutics: molecular characterization of resistance developed after continuous treatment with paclitaxel: doctoral dissertation; Faculty of biology University of Belgrade. Belgrade, 2013. 128 p. URL: https://doiserbia.nb.rs/phd/fulltext/BG20130704PODOLSKIRENIC.pdf (дата звернення 16.10.2024).

Poma P., Labbozzetta M., Ramarosandratana A. V., Rosselli S., Tutone M. *In vitro* modulation of P-glycoprotein activity by *Euphorbia intisy Essential oil* on acute myeloid leukemia cell line HL-60R. *Pharmaceuticals.* 2021. Vol. 14. № 2: 111. 20 p. https://doi.org/10.3390/ph14020111.

Ramezani M., Behravan J., Arab M., Amel Farzad S. Antiviral Activity of *Euphorbia helioscopia* Extract. *Journal of Biological Science.* 2008. № 8 (4). P. 809–813. https://doi.org/10.3923/jbs.2008.809.813.

Ramsay J.R., Suhrbier A., Aylward J.H., et al. The sap from *Euphorbia peplus* is effective against human nonmelanoma skin cancers. *Then British journal of dermatology.* 2011. Viol. 164. №3 P. 633–636. https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2010.10184.x.

Rizk A.F.M. The chemical constituents and economic plants of the *Euphorbiaceae. Botanical Journal of the Linnean Sociaty.* 1987. Vol. 94. № 1–2. P. 293–326. https://doi.org/ 10.1111/j.1095-8339.1987.tb01052.x.

Royal Botanic Gardens, Kew. Plants of the World Online [Електронний ресурс]. URL: https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:61899-2/images (дата звернення 12.10.2024).

Salehi B., Iriti M., Vitalini S., Antolak H., et al. *Euphorbia*-Derived Natural Products with Potential for Use in Health Maintenance. *Biomolecules.* 2019. Vol. 9. № 8:337. P. 1–22. https://doi.org/10. 3390/biom9080337.

Sciencephotolibrery. Scientific Photo Library of France [Електронний ресурс]. URL: https://www.sciencephoto.fr/image/11734639-Sea-spurge-Euphorbia-paralias (дата звернення 12.10.2024).

Scientific opinion on the re-evaluation of candelilla wax (E 902) as a food additive Aguilar Fernando, Crebelli Riccardo, Dusemund Birgit, et al. *European Food Safety Autority Journal.* 2012. Vol. 10. № 11: 2946. 27 p. doi: 10.2903/j.efsa.2012.2946 [Електронний ресурс]. URL: https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/j.efsa.2012.2946 (дата звернення 19.10.2024).

Seidelt R. Some remarks on *Euphorbia poissonii* Pax. *Euphorbia World*. 2021. Vol. 17. № 1. P. 46–52.

Shi Q.-W., Su X.-H., Kiyota H. Chemical and pharmacological research of the plants in genus Euphorbia. Chemical Reviews. 2008. Vol. 108. № 10. P. 4295–4327. https://doi.org/10.1021/cr078350s.

Sun Y.-X., Liu J.-C. Chemical constituents and biological activities of *Euphorbia fischeriana* Steud. *Chemistry and Biodiversity*. 2011. Vol. 8. № 7. P. 1205–1214. https://doi.org/10.1002/cbdv.201000115.

The Ayurvedic Pharmacopoeia of India Part-I. Volume-I. First edition / Coverment of India. Ministry of Health and Family Welfare. *Department of Indian Systems of Medicine Homoeopathy*. Delhi, 2001. 171 p. [Електронний ресурс]. URL: https://www.ayurveda.hu/api/API-Vol-1.pdf (дата звернення 15.10.2024).

The Encyclopedia of Succulents [Електронний ресурс]. URL: https://www.llifle.com/Encyclopedia/SUCCULENTS/Family/Euphorbiaceae/28041/Euphorbia_caducifolia (дата звернення 11.10.2024).

The IUCN Red List of Threatened Species. [Електронний ресурс] URL: https://www.iucnredlist.org/ (дата зверення 19.10.2024).

Tiwari S.K., Singh A.K. Biochemical stress response in freshwater fish Channa punctatus induced by aqueous extracts of Euphorbia tirucalli plant. *Chemosphere*. 2006. Vol. 64. № 1. P. 36–42. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.11.049.

Toyin Y.M., Ajiboye T.O., Akanji M.A. 15- Toxicity and Beneficial Effects of Some African Plants on the Reproductive System. *Toxicological Survey of African Medicinal Plants*. 2014. P. 445–492. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800018-2.00015-7.

Uchida H., Ohyama K., Suzuki M., et al. Triterpenoid levels are reduced during *Euphorbia tirucalli* L. callus formation. *Plant Biotechnology*. 2010. Vol. 27. № 1. P. 105–109. https://doi.org/10.5511/plantbiotechnology.27.105.

Unusual seeds [Електронний ресурс]. URL: https://unusualseeds.net/euphorbiaceae-a-comprehensive-collection-of-stem-succulents/ (дата зверенення 16.10.2024).

«Urbanarbolismo». The official website of the company [Електронний ресурс]. URL: https://www.urbanarbolismo.es/blog/aireacondicionado-vegetal-oficina/ (дата звернення 11.10.2024).

Valente C., Pedro M., Duarte A., et al. Bioactive diterpenoids, a new jatrophane and two ent-abietanes, and other constituents from Euphorbia pubescens. *Journal of Natural Products*. 2004. Vol. 67. № 5. P. 902–904. https://doi.org/10.1021/np0400048.

Valentine floral creations. The Greek Flouers Portal [Електронний ресурс]. URL: https://www.valentine.gr/linkOfTheMonth_gr-march2016.php (дата звернення 16.10.2024).

Vassiliades G. Note sur les propriétés molluscicides de deux Euphorbiacées: *Euphorbia tirucalli* et *Jatropha curcas*. Essais en laboratoire Sénégal. Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux. 1984. Vol. 37. № 1. P. 32–34. https://doi.org/10.19182/remvt.8447.

Wang Z.Y., Liu H.P., Zhang Y.C., Guo L.Q., Li Z.X., Shi X.F. Anticancer potential of *Euphorbia helioscopia* L. extracts against human cancer cells. *The Anatomical Record*. 2011. Vol. 295. № 2. P. 223–233. https://doi.org/10.1002/ar.21517.

West African Plants. A photo guide. [Electronic resource] URL: http://www.westafricanplants.senckenberg.de/root/index.php?page_id=14&species=2591# . (дата звернення 16.10.2024).

WFO (2024): World Flora Online. Published on the Internet [Електронний ресурс]. URL: http://www.worldfloraonline.org. (дата звернення 16.10.2024).

Zhang Y., Shi Y., Duan Na, Liu Bing-Bing, Mi Jia. Complete chloroplast genome of *Euphorbia tirucalli* (Euphorbiaceae), a potential biofuel plant. *Mitochondrial DNA Part B: Resources*. 2019. Vol. 4. № 1. P. 1973–1974. https://doi.org/10.1080/23802359.2019.1617069.

References

Ghajdarzhy, M.M. (2009). Zhyttjevi formy i ontomorfoghenez sukulentnykh roslyn [Life forms and ontomorphogenesis of succulent plants]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Kyjivsjkyj nacionaljnyj universytet imeni Tarasa Shevchenka. Kyiv, 40 p. [in Ukrainian].

Kapustjan, V.V., Nikitina V.V., & Ghajdarzhy M.M. (2004). Kolekcija tropichnykh ta subtropichnykh roslyn botanichnogho sadu imeni akad. O.V. Fomina KNU imeni Tarasa Shevchenka [Collection of

tropical and subtropical plants of the botanical garden named after Academician O.V. Fomin of Taras Shavchenko National University of Kyiv]. *Introdukcija roslyn [Introduction of plants]*, 1, 27–35 [in Ukrainian].

Likarsjki roslyny: Encyklopedychnyj dovidnyk (1992). [Medicinal plants: Encyclopedic guide] / vidp.red. A.M. Ghrodzinsjkyj. Kyiv : Vydavnyctvo «Ukrajinsjka Encyklopedija» im. M.P. Bazhana. Ukr. vyrob.-komerc. centr «Olimp», 544 s. [in Ukrainian].

Lughova, O.M., & Badanina, V.A. (2022). Dosvid vykorystannja sukulentiv pry stvorenni vertykaljnykh sadiv [Experience using succulents in creating vertical gardens]. «*Suchasni naukovi doslidzhennja: dosjaghnennja, innovaciji ta perspektyvy rozvytku» XIV Mizhnarodna naukovo-praktychna konferencija* (17-19 lypnja 2022 r.) [«*Modern scientific research: achievements, innovations and development prospects» The 14 th International scientific and practical conference* (July 17–19, 2022). MDPC Publishing, Berlin, Germany, 22–29 [in Ukrainian].

Nechytajlo, V.A., & Kucherjava L.F. (2000). Botanika. Vyshhi roslyny [Botany. Higher plants]. Kyiv : Fitosociocentr, 432 p. [in Ukrainian].

Oghijenko, T.Ju. (2023). Mikrobiologhichne obgruntuvannja novykh zasobiv na osnovi likarsjkykh roslyn dlja likuvannja kandydozu rotovoji porozhnyny [Microbiological substantiation of new means based on medicinal plants for the treatment of candidiasis of the oral cavity]. *Doctor's thesis*. Iv.-Frankivsjk, 206 p. [in Ukrainian].

Cebrzhynsjkyj, O.I., & Orlova, L.D. (2013). Toksychni predstavnyky rodyny molochajnykh (Euphorbiaceae) [Toxic representatives of the milkweed family (Euphorbiaceae)]. *Bioriznomanittja Ukrajiny v svitli noosfernoji koncepciji akademika V.I. Vernadsjkogho: materialy Vseukrajinsjkoji naukovo-praktychnoji konferenciji* [*Biodiversity of Ukraine in the light of the noosphere concept of Academician V.I. Vernadskyi: materials of the All-Ukrainian scientific and practical conference*] / Za zaghaljnoju redakcijeju prof. M.V. Ghrynjovoji. Poltava : Astraja, pp. 215–219 [in Ukrainian].

Chaghovecj, R.K., Percev I.M., & Soboljeva, V.O. (1967). Vyvchennja dejakykh vydiv Molochajiv [Study of some species of milkweed]. *Farmacevtychnyj zhurnal* [*Pharmaceutical journal*], 3, 64–67 [in Ukrainian].

Abdelgadir, H.A., Johnson, S.D., & Van Staden, J.V. (2012). Pollen viability, pollen germination and pollen tube growth in the biofuel seed crop *Jatropha curcas* (*Euphorbiaceae*). *South African Journal of Botany*, 79, 132–139. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2011.10.005 [in English].

Ahmad, V.U., Hussain, H.B., & Bukhari, I.A.S. (ed.) (2005). Antinociceptive diterpene from *Euphorbia decipiens*. *Fitoterapia*, volume 76, issue 2, 230–232. https://doi.org/10.1016/j.fitote.2004.12.014 [in English].

Aleksandrov, M., Maksimova, V., & Koleva Gudeva, L. (2019). Review of the Anticancer and Cytotoxic Activity of some Species from Genus *Euphorbia*. *Agric. conspec. sci.,* 84 (1), 1–5 [in English].

Bakhshi, G.D., Langade, D.G., & Desai, V.S. (2008). Prospective, Open label study of *Euphorbia prostrata* extract 100 mg in the treatment of bleeding haemorrhoids. *Bombay Hospital Journal*, 50 (4), 577–583 [in English].

Bani, S., Kaul, A., Jaggi, B.S., Suri KA, Suri, O.P., & Sharma, O.P. (2000). Anti-inflammatory activity of the hydrosoluble fraction of *Euphorbia royleana* latex. *Fitoterapia,* 71 (6), 655–662. https://doi.org/10.1016/s0367-326x(00)00225-2 [in English].

Barla-Demirkoz, A., Öztürk, M., Kültür, Ş.K., & Öksüz, S. (2007). Screening of antioxidant activity of three *Euphorbia* species from Turkey. *Fitoterapia*, 78 (6), 423–425. https://doi.org/10.1016/j.fitote.2007.02.021 [in English].

Basma, A.A., Zakaria, Z., Latha, L.Y., & Sasidharan, S. (2011). Antioxidant activity and phytochemical screening of the methanol extracts of *Euphorbia hirta* L. *Asian Pac J Trop Med.*, 4 (5), 386–390. https://doi.org/10.1016/S1995-7645(11)60109-0 [in English].

Bolaji, A.O., Adeniran, I.O., Awotunde, A., & Akinpelu, B.A. (2019). Evaluation of Chemical Composition, Anti-inflammatory, Antioxidant and Cytotoxic Potential of Leaf and Root Extracts of *Euphorbia graminae*. *Tropical Journal of Natural Product Research*, 3 (6), 201–209. https://doi.org/10.26538/tjnpr/v3i6.4 [in English].

Boutoub, O., El-Guendouz, S., Estevinho, L.M., & Paula, V.B. (ed.) (2021). Antioxidant activity and enzyme inhibitory potential of *Euphorbia resinifera* and *E. officinarum* honeys from Morocco and plant aqueous extracts. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 503–517. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10489-6 [in English].

Calvin, M. (1982). Energy agriculture. Presented at the *Symposium on Controversial Topics in Agricultural and Food Chemistry* (12–17 Sept. 1982). American Chemical Society, Kansas City, Mo,

U.S.A, pp. 1–46. [Electronic resource] URL: https://escholarship.org/uc/item/9790c7gt (access date 16.10.2024) [in English].

Choudhary, R., & Tandon, R.V. (2009). Consumption of functional food and our health concerns. *Pakistan Journal of Physioloqy*, 5 (1), 73–86. https://doi.org/10.69656/pjp.v5i1.713 [in English].

Dabholkar, D.A., Kaicker, P.K., & Diwan, R.K. (1991). Euphorbia latex-Its chemistry and industrial applications: Part 1. *Research and Industry,* 36 (2), 126–131 [in English].

Dias Dileep, E., Sarathlal, P. S., Ajith Babu, T. K., & Ayishath Shabna (2021). Cnidoscolus Aconitifolius – An Overview. *International Journal of Research and Scientific Innovation (IJRSI)*, 8 (7), 22–24. https://doi.org/10.51244/IJRSI.2021.8703 [in English].

González-Stuart, A.E., & Rivera, J.O. (2019). Chapter 14-Herbal Weight Loss Supplements: From Dubious Efficacy to Direct Toxicity / book *Dietary Interventions in Liver Disease (Foods Nutrients, and Dietary Supplements)* edited by Ronald Ross Watson and Victor R. Preedy. Academic Press, 175–181. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814466-4.00014-8 [in English].

Gouri, V., Pandey, S.C., Joshi, D., Pande, V., Upreti, S., & Samant, M. (2021). Chapter 8 – Natural products as a novel source for antileishmanial drug development. *Pathogenesis, Treatment and Prevention of Leishmaniasis*, 141–159. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822800-5.00011-1 [in English].

Hastilestari, B.R., Mudersbach, M., & Tomala, F. (ed.) (2013). *Euphorbia tirucalli* L.– Comprehensive Characterization of a Drought Tolerant Plant with a Potential as Biofuel Source. *PlosONE*, 8(5), e63501. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0063501 [in English].

Hempen, C.-H., & Fischer, T. (2009). III-Herbs that purge and drain. *A Materia Medica for Chinese Medicine (Plants, minerals and animal products)*: book / C.-H. Hempen, T. Fischer. Churchill Livingstone, Elsevier Ltd, 84–109. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-10094-9.00006-6 [in English].

Jian, B., Zhang, H., Han, C., & Liu, J. (2018). Anti-Cancer Activities of Diterpenoids Derived from *Euphorbia fischeriana* Steud. Molecules, 23 (2), 387, 1–11. https://doi.org/10.3390/molecules23020387 [in English].

Johari, S., & Kumar, A. (2013). Improving growth and productivity of *Euphorbia antisyphilitica*: a biofuel plant for semi-arid regions. *International Journal of Life science & Pharma Research*, 3 (4), 20–24 [in English].

Krisnawati, H., Kallio, M., & Kanninen, M. (2011). *Aleurites moluccana* (L.) Willd.: ecology, silviculture and productivity. *CIFOR (Center of International Forestry Research)*, Bogor, Indonesia. 11 p. [in English].

Kuete, V. (2014). 22 – Physical, Hematological, and Histopathological Signs of Toxicity Induced by African Medicinal Plants. *Toxicological Survey of African Medicinal Plants:book* / edited by Victor Kuete. Elsevier, 635–657. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800018-2.00022-4 [in English].

Kumar, S., Harichandan Priyadarshini, S.S., & Acharya Prangya Paramita (ed.) (2019). Green synthesis and biochemical characterization of silver nanoparticles by using *Euphorbia umbellata* leaf extract and analysis of antimicrobial activity against plant Pathogens. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, 08 (02), 59–69. https://doi.org/10.30574/gscbps.2019.8.2.0137 [in English].

Vikas Kurhekar, J. (2021). Chapter 4 – Ancient and modern practices in phytomedicine. *Preparation of Phytopharmaceuticals for the Management of Disorders. The Development of Nutraceuticals and Traditional Medicine*: book / edited by: Chukwuebuka Egbuna, Abhay Prakash Mishra and Megh R. Goyal. Academic Press is an imprint of Elsevier, 55–75. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820284-5.00019-8 [in English].

Liu, J., Sun, Y., Liu, L., & Yu, C. (2012). A water-soluble polysaccharide (EFP-AW1) from the alkaline extract of the roots of a traditional Chinese medicine, *Euphorbia fischeriana*: Fravtion and characterization. *Carbohydrate Polymers*, 88 (4), 1299–1303. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.02.004 [in English].

Ma, Q.-G., Liu, W.-Z., Wu, X.-Y., Zhou, T.-X., & Qin, G.-W. (1997). Diterpenoids from *Euphorbia fischeriana. Phytochemistry,* 44 (4), 663–666. https://doi.org/10.1016/S0031-9422(96)00605-X [in English].

Mali, Prashant Y., & Panchal, Shital S. (2017). *Euphorbia neriifolia* L.: Review on botany, ethnomedicinal uses, phytochemistry and biological activities. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 10 (5). 430–438. https://doi.org/10.1016/j.apjtm.2017.05.003 [in English].

Montaluisa-Mantilla, M.S., García-Encina, P., Lebrero, R., & Muñoz, R. (2023). Botanical filters for the abatement of indoor air pollutants. *Chemosphere*, 345, (140483), 1–15. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140483 [in English].

Mwine, J.T. (2011). Evaluation of Pesticidal Properties of *Euphorbia tirucalli* L. (Euphorbiaceae) against Selected Pests. PhD thesis. Belgium: Ghent University, Faculty of Bioscience Engineering, 145p. [in English].

Mwine, J., Van Damme, P., Hastilestari, B.R., & Papenbrock, J. (2013). *Euphorbia tirucalli* L. (Euphorbiaceae) – The Miracle Tree: Current Status of Knowledge. *African Natural Plant Products.* Volume II: *Discoveries and Challenges in Chemistry, Health, and Nutrition*, Chapter 1, 3–7. https://doi.org/10.1021/bk-2013-1127.ch001 [in English].

Nafiu, M.O., Salawu, M.O., & Kazeem, M.I. (2013). 21–Antioxidant Activity of African Medicinal Plants. *Medicinal Plant Research in Africa. Pharmacology and Chemistry*: book / ed. Victor Kuete, Elsevier, 787–803. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405927-6.00021-7 [in English].

Nazemiyeh, H., Kazemi, E.M., Zare, K., Jodari, M., Nahar, L., & Sarker, S.D. (2010). Free radical scavengers from the aerial parts of *Euphorbia petiolata. Journal of Natural Medicines*, 64, 187–190. https://doi.org/10.1007/s11418-009-0382-0 [in English].

Nchimbi, H.Y. (2021). Hydrocarbon yields and stability from Euphorbia tirucalli for quality energy use. *Energy Conversion and Management: X.*, 12, 9 p. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100122 [in English].

Newton, L.E. (2024). *Euphobias* as hedhes. *Euphorbia World*, 19 (2), 11–12 [in English].

Nishimura, T., Wang, L.Y., Kusano, K., & Kitanaka, S. (2005). Flavonoids that mimic human ligands from the whole plants of *Euphorbia lunulata. Chem Pharm Bull (Tokyo)*, vol. 53, 3, 305–308. https://doi.org/10.1248/cpb.53.305 [in English].

Opeyemi G. Oso, Joseph, O. Sunday, & Alexander B. Odaibo (2023). Temporal modelling of *Lymnaea natalensis* (Krauss, 1848) in tropical aquatic habitats. *Onderstepoort Journal of Veterinary Research*, 90 (1), 1–13. https://doi.org/10.4102/ojvr.v90i1.2023 [in English].

Özbilgin, S., & Saltan Citoğlu, G. (2012). Uses of some *Euphorbia* species in traditional medicine in Turkey and their biological activities. *Turkish Journal of Pharmaceutical Sciences*, 9 (2), 241–256 [in English].

Patan Shaik Sha Valli Khan, Rajeswari, B., Kumar, S.P., & Terry, R.G. (2021). Use of *Euphorbia* sp. (Euphorbiaceae) as biofuel feedstock for semi-arid and arid lands. *Biofuels*, 12 (5), 511–521. https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1501637 [in English].

Petrovska, B.B. (2012). Historical review of medicinal plants' usage. *Pharmacognosy Reviews*, 6 (11), 1–5. https://doi.org/10.4103/0973-7847.95849 [in English].

Podolski-Renić, A. (2013). The establishing of resistant cancer cell lines as a model for testing of new chemotherapeutics: molecular characterization of resistance developed after continuous treatment with paclitaxel: doctoral dissertation; Faculty of biology University of Belgrade. Belgrade, 128 p. [Electronic resource] URL: https://doiserbia.nb.rs/phd/fulltext/BG20130704PODOLSKIRENIC.pdf (access date 16.10.2024) [in Serbian].

Poma, P., Labbozzetta, M., Ramarosandratana, A.V., Rosselli, S., & Tutone, M. (2021). *In vitro* modulation of P-glycoprotein activity by *Euphorbia intisy Essential oil* on acute myeloid leukemia cell line HL-60R. *Pharmaceuticals,* 14 (2), 111. 20 p. https://doi.org/10.3390/ph14020111 [in English].

Ramezani, M., Behravan, J., Arab, M., & Amel Farzad, S. (2008). Antiviral Activity of *Euphorbia helioscopia* Extract. *Journal of Biological Science*, 8 (4), 809–813. https://doi.org/10.3923/jbs.2008.809.813 [in English].

Ramsay, J.R., Suhrbier, A., & Aylward, J.H. (ed.) (2011). The sap from *Euphorbia peplus* is effective against human nonmelanoma skin cancers. *The British journal of dermatology*, 164, 633–636. https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2010.10184.x [in English].

Rizk, A.F.M. (1987). The chemical constituents and economic plants of the *Euphorbiaceae. Botanical Journal of the Linnean Sociaty,* 94 (1–2), 293–326. https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.1987.tb01052.x [in English].

Salehi, B., Iriti, M., Vitalini, S., & Antolak, H. (ed.) (2019). *Euphorbia*-Derived Natural Products with Potential for Use in Health Maintenance. *Biomolecules,* 9 (8):337, 1–22. https://doi.org/10.3390/biom9080337 [in English].

Seidelt, R. (2021). Some remarks on *Euphorbia poissonii* Pax. *Euphorbia World*, 17 (1), 46–52 [in English].

Shi, Q.-W., Su, X.-H., & Kiyota, H. (2008). Chemical and pharmacological research of the plants in genus *Euphorbia*. *Chemical Reviews*, 108 (10), 4295–4327. https://doi.org/10.1021/cr078350s [in English].

Sun, Y.-X., & Liu, J.-C. (2011). Chemical constituents and biological activities of *Euphorbia fischeriana* Steud. *Chemistry and Biodiversity*, 8 (7), 1205–1214. https://doi.org/10.1002/cbdv.201000115 [in English].

Tiwari, S.K., & Singh, A.K. (2006). Biochemical stress response in freshwater fish Channa punctatus induced by aqueous extracts of Euphorbia tirucalli plant. *Chemosphere*, 64(1), 36–42. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.11.049 [in English].

Toyin, Y.M., Ajiboye, T.O., & Akanji, M.A. (2014). 15–Toxicity and Beneficial Effects of Some African Plants on the Reproductive System. *Toxicological Survey of African Medicinal Plants*, 445–492. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800018-2.00015-7 [in English].

Uchida, H., Ohyama, K., & Suzuki, M. (ed.) (2010). Triterpenoid levels are reduced during *Euphorbia tirucalli* L. callus formation. *Plant Biotechnology*, 27 (1), 105–109. https://doi.org/10.5511/plantbiotechnology.27.105 [in English].

Valente, C., Pedro, M., & Duarte, A. (ed.) (2004). Bioactive diterpenoids, a new jatrophane and two ent-abietanes, and other constituents from *Euphorbia pubescens*. *Journal of Natural Products*, 67 (5), 902–904. https://doi.org/10.1021/np0400048 [in English].

Vassiliades, G. (1984). Note sur les propriétés molluscicides de deux Euphorbiacées: *Euphorbia tirucalli* et *Jatropha curcas*. Essais en laboratoire Sénégal. Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux, 37 (1), 32–34. https://doi.org/10.19182/remvt.8447 [in French].

Wang, Z.Y., Liu, H.P., Zhang, Y.C., Guo, L.Q., Li, Z.X., & Shi, X.F. (2011). Anticancer potential of *Euphorbia helioscopia* L. extracts against human cancer cells. *The Anatomical Record*, 295 (2), 223–233. https://doi.org/10.1002/ar.21517 [in English].

Zhang, Y., Shi, Y., Duan, Na, Liu, Bing-Bing, & Mi, Jia (2019). Complete chloroplast genome of *Euphorbia tirucalli* (Euphorbiaceae), a potential biofuel plant. *Mitochondrial DNA Part B: Resources*, 4. (1), 1973–1974. https://doi.org/10.1080/23802359.2019.1617069 [in English].

Отримано: 22.10.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

УДК 582.26/.27:504.61:355.01](282)(477.41)
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.2

ФІТОПЛАНКТОН МАЛОЇ РІЧКИ ЯК ПОКАЗНИК ЯКОСТІ ВОД В УМОВАХ ЗМІН КЛІМАТУ ТА ВОЄННИХ ДІЙ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

Ю. С. Шелюк[1], Д. С. Махнєвич[2], О. С. Солонько[3]

У роботі обговорюються деякі актуальні питання оцінки якості вод малих водотоків в умовах змін клімату та воєнних дій на території України на прикладі р. Таль (Київська область, Бородянський та Іванківський райони). Отримані впродовж вегетаційних сезонів 2023–2024 рр. дані щодо структурно-функціональних та індикаторних характеристик водоростей водотоку порівнювали з відомостями за 2004–2005 рр., опублікованими Ю. С. Шелюк за результатами експедиційних досліджень. На сучасному етапі функціонування річкової екосистеми у фітопланктоні р. Таль виявлено 42 види та внутрішньовидові таксони водоростей із номенклатурним типом виду включно з 9 відділів. За складом провідних таксонів він є зелено-діатомово-евгленовий. Встановлено збіднення видового складу річкового фітопланктону за останні 10 років, у першу чергу за рахунок помітного зниження частки діатомових водоростей (із 27 видів до 9). Збіднення, найімовірніше, зумовлене посиленням негативного антропогенного впливу, а також кліматичними змінами. Встановлено й спрощення таксономічної структури фітопланктону, на що вказує зменшення родового коефіцієнту у часі.
У структурі фітопланктону річки провідна роль належала планктонно-бентосним мешканцям, меншу представленість у складі водоростевих угруповань мали планктонні, бентосні і ґрунтові форми. Наявність значної частки бентосних видів у складі планктону зумовлено особливостями мілководних ділянок малих річок, яким властиве вітрове перемішування і як наслідок – відрив бентосних і ґрунтових форм. За температурною приуроченістю більшість індикаторних видів належали до евритермних, помітною була й частка теплолюбних, що, вірогідно, є результатом глобальних змін клімату. За реофільністю переважали стоячо-текучі (малорухливі) види – індикатори вод середньозабезпечених киснем, 33% належали до стоячих форм із порівняно низькою

[1] доктор біологічних наук, професор,
професор кафедри ботаніки, біоресурсів і збереження біорізноманіття
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: Shelyuk_Yulya@ukr.net
ORCID: 0000-0001-6429-1028
[2] заступник директора з навчально-виховної роботи,
вчитель біології та хімії
(Середня загальноосвітня школа №205 Святошинського району, м. Київ)
e-mail: maxnevichcompany@gmail.com
ORCID: 0009-0005-8524-2379
[3] учень 11-А класу
(Середня загальноосвітня школа №205 Святошинського району, м. Київ)
e-mail: solonkooleksandr87@gmail.com
ORCID: 0009-0004-3069-598X

насиченістю киснем, що відповідає місцю існування фітопланктону – мілководна річка із низькою інтенсивністю фотосинтетичної аерації. Більшість видів планктонних водоростей р. Таль є прісноводними формами. Присутність солелюбних форм (олігогалобів-галофілів, мезогалобів) є результатом зростання мінералізації унаслідок осушення, що призводить до зміни різноманіття водоростей і є одним із кліматичних чинників, який впливає на формування альгофлори Українського Полісся. За приуроченістю до pH у р. Таль переважали індиференти, водночас помітною була й частка ацидофілів (13%), що вказує на помірний вплив ацидофікації і процеси незначного закиснення. З'ясовано, що переважна більшість водоростей водотоку за сапробністю належить до III класу якості вод – «вода задовільної якості».

Ключові слова: *фітопланктон, річка, якість води, сапробність, біомоніторинг, індикаторі види.*

PHYTOPLANKTON OF A SMALL RIVER AS AN INDICATOR OF WATER QUALITY IN THE CONDITIONS OF CLIMATE CHANGE AND MILITARY ACTIONS ON THE TERRITORY OF UKRAINE

Yu. S. Sheliuk, D. S. Makhnevych, O. S. Solonko

The work discusses some topical issues of water quality assessment of small watercourses under the conditions of climate change and military operations on the territory of Ukraine, using the example of the Tal River (Kyiv region, Borodyanskyi and Ivankivskyi districts). The data obtained during the growing seasons of 2023–2024 regarding the structural-functional and indicator characteristics of watercourse algae were compared with the information obtained in 2004–2005. At the current stage of functioning of the river ecosystem in the phytoplankton of the Tal River, 42 species and intraspecific taxa of algae with the nomenclatural type of the species, including 9 divisions, were found. According to the composition of the leading taxa, it is green-diatom-euglenous. Impoverishment of the species composition of river phytoplankton over the past 10 years was established, primarily due to a noticeable decrease in the share of diatoms (from 27 species to 9). The impoverishment is most likely due to the increase of negative anthropogenic influence, as well as climatic changes. A simplification of the taxonomic structure of phytoplankton was also established, as indicated by a decrease in the genus coefficient over time.
In the structure of phytoplankton of the river, the leading role belonged to planktonic and benthic inhabitants, planktonic, benthic and soil forms had a smaller representation in the composition of algal communities. The presence of a significant share of benthic species in the composition of plankton is due to the peculiarities of shallow areas of small rivers, which are characterized by wind mixing and, as a result, separation of benthic and soil forms. The presence of a significant share of benthic species in the composition of plankton is due to the peculiarities of shallow areas of small rivers, which are characterized by wind mixing and, as a result, separation of benthic and soil forms. According to the temperature limitation, most of the indicator species belonged to eurythermic species, the share of thermophilic species was also noticeable, which is probably the result of global climate changes. In terms of rheophilicity, stagnant-flowing (slowly mobile) species prevailed – indicators of moderately oxygenated waters, 33% belonged to stagnant forms with relatively low oxygen saturation, which corresponds to the place of phytoplankton existence – a shallow river with a low intensity of photosynthetic aeration Most species of planktonic algae r. Thallus are freshwater forms. The presence of salt-loving forms (halophilic oligohalobes, mesohalobes) is the result of increased mineralization as a result of drying, which leads to a change in the diversity of algae and is one of the climatic factors that affects the formation of the algoflora of the Ukrainian Polissia. In relation to pH, indifferents prevailed in the Tal River, while the proportion of acidophiles (13%) was also noticeable, which indicates a moderate effect of acidification and slight acidification processes. It was found that the vast majority of watercourse algae according to saprobicity belong to the III class of water quality – «water of satisfactory quality».

Key words: *phytoplankton, river, water quality, saprobity, biomonitoring, indicator species.*

Вступ

У зв'язку з глобальним антропогенним впливом на річкові екосистеми, обумовленим ростом міських агломерацій, гідротехнічним будівництвом, потраплянням полютантів різної природи зі стічними водами, кліматичними змінами актуальною проблемою сьогодення є оцінка якості води річок і їх біомоніторинг (Терміни …, 2015; Афанасьєв, 2018; Постанова …, 2018; Проект …, 2018).

Із початку повномасштабного вторгнення російської федерації на територію України посилюються екологічні ризики щодо забруднення водних екосистем як внаслідок прямого потрапляння у них полютантів через згорання пропеленту, нафтопродуктів, так і непрямого впливу руйнування мостів, гребель берегової лінії. Водні екосистеми України зазнали патологічного впливу на їх біорізноманіття, який зумовив загибель риб, порушення міграційних циклів водних птахів, послаблення потенціалу гідроекосистем до природного відновлення. Основними агентами самоочищення річок є фотоавтотрофи, у першу чергу фітопланктон, оскільки ця група організмів формує структурно-функціональні зв'язки на різних рівнях їх організації: популяційно-видовому та ценотичному (Deng et al., 2016; Shelyuk & Shcherbak, 2018).

На сьогодні вивченню водоростевих угруповань планктону річок в умовах змін клімату та воєнних дій на території України не приділяється достатньої уваги, тому вивчення цих груп гідробіонтів є особливо актуальним.

Саме тому дослідження різноманіття фітопланктону р. Таль та оцінка якості води за індикаторними видами водоростей є актуальними.

Мета: з'ясувати основні тенденції змін структурно-функціональних та індикаторних характеристик фітопланктону малої річки в умовах змін клімату та воєнних дій на території України.

Матеріал і методи

Річка Таль – права притока Тетерева (басейн Дніпра), має довжину 51 км, площу водозбірного басейну 357 км^2, похил – 0,9 м/км. Протікає в межах Іванківського й Бородянського районів Київської області. Долина пласка, завширшки 2,5 км, має глибину до 15 м. Стік річки в середній течії зарегульований. Річище слабко звивисте (Географічна ..., 1989).

Матеріалом даної роботи слугували 40 альгологічних проб планктону, зібрані протягом 2023–2024 рр. на р. Таль (50°56′11″ пн. ш. 29°56′34″ сх. д.). Відібраний матеріал вивчався у фіксованому (40%-й розчин формаліну) стані. Для обліку чисельності водоростей застосовували камеру Нажотта об'ємом 0,5 см^3 та світловий мікроскоп ОМО АУ – 12 (Методи..., 2006; Ignatiades, 2020). Визначення систематичного (видового) складу водоростей проводили згідно загальноприйнятих правил за традиційними в альгології вітчизняними визначниками та іноземними посібниками з урахуванням флористичних зведень (Tsarenko et al., 2006; 2009; 2011) відповідно до міжнародного електронного каталогу AlgaeBase (Guiry & Guiry, 2020). Чисельність, біомасу фітопланктону та частоту трапляння видів розраховували за стандартними методиками (Методи ..., 2006), описаними у попередній публікації (Shelyuk, 2024). Індекс сапробності розраховано за системою Пантле-Бук у модифікації Сладечека на основі індивідуальних індексів сапробності ідентифікованих видів-індикаторів (Pantle & Buck, 1955). Біоіндикаційний аналіз (Мальцев та ін.., 2011) проведено з урахуванням індикаторних характеристик водоростей (Barynova et al., 2006). Отримані дані сапробіологічного аналізу за індикаторними видами водоростей були співставлені з класами якості вод відповідно до (Методи ..., 2006). При проведенні біоіндикаційного аналізу отримані результати представляли за допомогою графіків Excel. Там групи водоростей, що є індикаторами, розмістили в порядку зростання їх індикаторного значення. Це дало можливість побудувати поліномінальні лінії тренда. Такий розподіл за своєю формою наближається до кривої Гауса, саме тому використання поліноміальних трендів було найдоцільнішим, і дозволило встановити екологічні оптимуми за параметрами зовнішнього оточення в угрупованнях, які аналізувалися.

Результати

Упродовж вегетаційного сезону 2023–2024 рр. у планктоні р. Таль виявлено 42 види та внутрішньовидові таксони водоростей із номенклатурним типом виду включно з 9 відділів (рис. 1) за провідної ролі зелених, діатомових й евгленід.

Максимальну частоту трапляння мали: *Euglena proxima* Dang. (55%), *Trachelomonas volvocina* Ehr. (53%), *Chlamydomomas globosa* Snow. (43%), *Phacotus coccifer* Korsch. (41%). Поява у складі «провідних» евгленових водоростей засвідчує помітний вміст органічних речовин як природного, так і антропогенного походження.

Кількісні показники розвитку фітопланктону р. Таль упродовж 2023–2024 рр. коливалися у широких межах (біомаса змінювалася від 0,009 до 6,38 г/м^3, чисельність – від 14 тис. до 2 млн. кл/дм^3. Середня біомаса упродовж вегетаційного сезону становила 0,34±0,01 г/м^3, чисельність – 59,18±1,26 тис. кл/дм^3. Середня

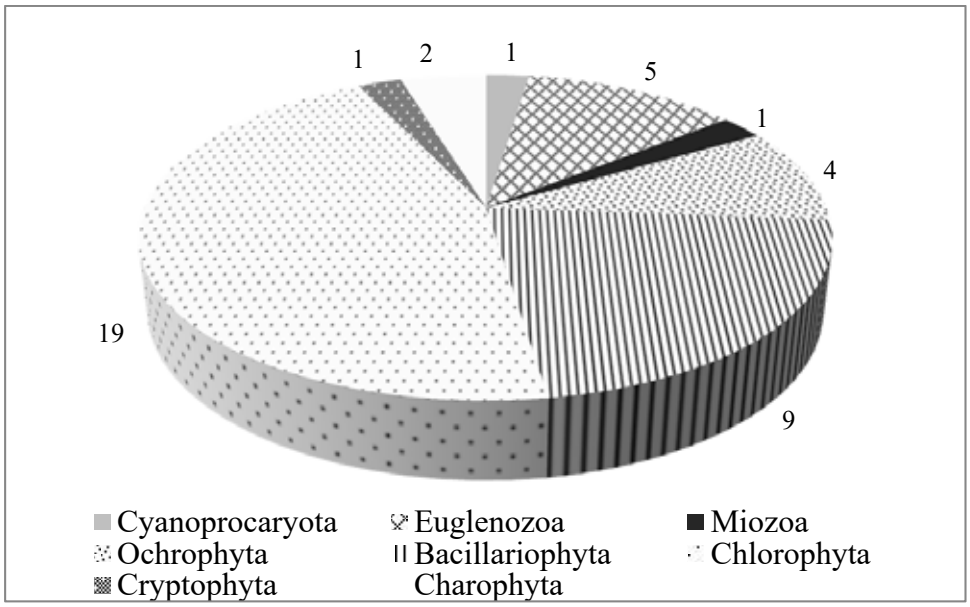


Рис. 1. Таксономічний склад фітопланктону р. Таль
(за результатами досліджень 2023–2024 рр.)

біомаса фітопланктону весною становила 0,28±0,03 г/м^3, чисельність – 22,84±0,22 тис. кл/дм^3, влітку – 0,59±0,03 г/м^3 та 175±0,10 тис. кл/дм^3, восени – 0,31±0,02/м^3, та 47,56±0,07 тис. кл/дм^3.

На основі встановленого видового складу планктонних водоростей проведено біоіндикаційний аналіз (рис. 2). Ідентифіковані водорості є індикаторами якості вод за такими показниками як: приуроченість до субстрату (місцезростання), pH, солоність, реофільність та насичення води киснем, органічне забруднення (сапробність), трофність, температура води. Найчастіше кожен із виявлених видів був індикатором декількох показників (див. рис. 2).

У структурі фітопланктону річки Таль провідна роль належала планктонно-бентосним (13) мешканцям, меншу представленість у складі водоростевих угруповань планктону мали планктонні (10), бентосні (9) і ґрунтові форми (2). Наявність значної частки бентосних форм у складі планктону зумовлена особливостями мілководних ділянок малих річок, яким властиве вітрове перемішування і як наслідок – відрив бентосних і ґрунтових видів.

За температурною приуроченістю більшість видових і внутрішньовидових таксонів належить до евритермних – 60% від загального числа видів-індикаторів температурного режиму. Помітною є й частка теплолюбних форм, що, вірогідно, є результатом глобальних змін клімату, оскільки саме територія Полісся в останнє десятиріччя зазнає найпомітнішого, навіть у порівнянні з південними регіонами, підвищення рівня температури (Бабіченко та ін., 2007). Загалом, не дивлячись на те, що оцінка температурного інтервалу за біоіндикацією розвинена ще недостатньо, встановлений інтервал помірних температур, як регіональну кліматичну норму.

За реофільністю 63% видів належать до стоячо-текучих (малорухливих) вод середньо-забезпечених киснем, 33% – до стоячих форм із порівняно низькою насиченістю киснем, 4% – до текучих форм. Це відповідає місцю існування фітопланктонну – мілководна річка із низькою фотосинтетичною аерацією.

Більшість видів планктонних водоростей р. Таль є прісноводними формами – 24–64% від числа форм. Присутність солелюбних форм (олігогалобів-галофілів 20% – 8, мезогалобів 4% – 2) є результатом зростання мінералізації внаслідок осушення, що призводить до зміни різноманіття водоростей і є одним із кліматичних чинників, який впливає на формування альгофлори. Зміління малих річок в Україні має катастрофічний характер, прогнозовано, частина малих водотоків можуть взагалі зникнути.

За приуроченістю до pH середовища у р. Таль переважали групи індиферентів (71%) та алкаліфілів (11%), водночас помітною була й частка ацидофілів (13%). Це вка-

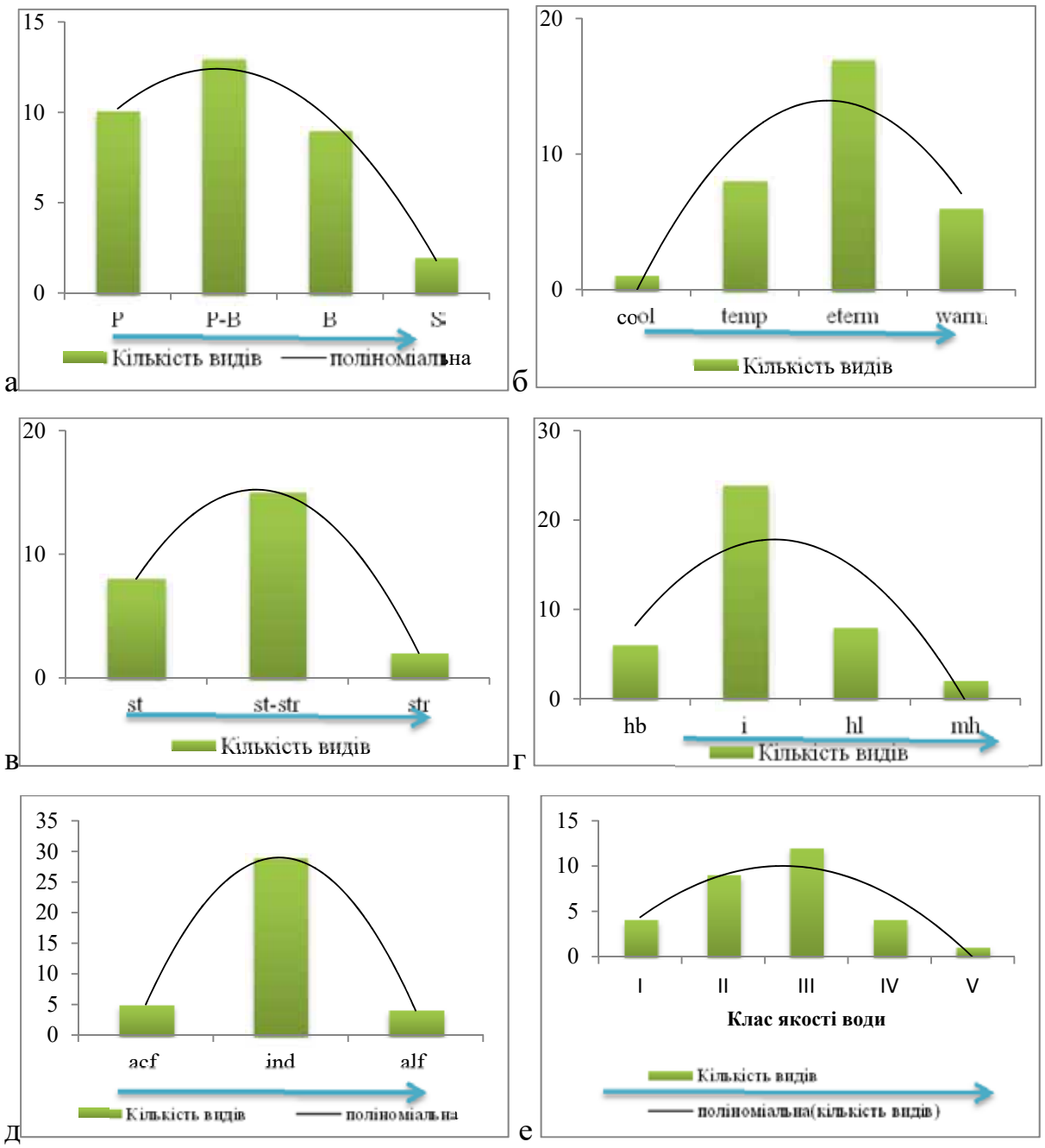


Рис. 2. Співвідношення водоростей-індикаторів екологічних умов у р. Таль

Примітка. А – Співвідношення індикаторів місця існування (В – бентосні; Р-В – планктонно-бентосні; Р – планктонні; S – ґрунтові); Б – температурних умов (warm – теплолюбні; cool – холодолюбні; temp – помірного діапазону та/або індиферентні; eterm – евритермні); В – насиченості вод киснем та реофільноості (st – стоячі, st-str – повільно текучі та / або індиферентні, str – швидкотекучі); Г – індикаторів солоності (mh – мезогалоби; i – олігалоби-галофіли; hl – олігогалоби-галофіли; hb – олігогалоби-галофоби); Д – pH середовища (ind – індиферентні; alf-алкаліфіли; acf – ацидофіли); Е – співвідношення кількості індикаторів класів якості води. Стрілка на графіках А-Д позначає напрям посилення дії чинника середовища, а на Е – напрям посилення органічного забруднення.

зує на помірний вплив ацидофікації і процеси незначного закислення.

Сапробіологічна характеристика якості води р. Таль представлена на основі співвідношення видів-індикаторів, які визначають різний стан органічного забруднення водної екосистеми. У фітопланктоні річки переважали *β*-мезосапроби – 36% видів, різновидів

та форм водоростей, *β-α*-мезосапроби – 12%, *α-β*-мезосапроби – 9%. Частка оліго-*α*-мезосапробів склала 17%; оліго-*β*-мезосапробів – 13%, *β*-олігосапробів – 9%, частка олігосапробів, *α*-сапробіонтів, ксено-олігосапробів та оліго-ксеносапробіонтів, склала по 2% – 1 (1).

Загалом індикаторні види водоростей розділилися між 5-ма класами якості вод. Переважна їх більшість належить до III класу якості вод – «вода задовільної якості» (див. рис. 2). Йому відповідають представники *β*-олігосапробіонтів, *β*-мезосапробіонтів, *α-β*-сапробіонтів. Однак, вершина лінії тренда на графіку знаходиться між II і III класами якості вод.

Щодо географічної характеристики, то переважна більшість видів досліджуваного водотоку належить до космополітів. Також у складі альгофлори річки ідентифіковано голарктичні форми, аркто-арктичні, альпійські, голарктично-палеотропічні і циркумбореальні.

Обговорення

Наявні літературні дані щодо автотрофної ланки р. Таль датуються 2004–2005 рр. (Кузьмінчук, 2005). Фітопланктон водотоку за загальним числом видів у відділах характеризувався як діатомово-зелено-евгленовий. Значна частка Euglenozoa (третє місце за видовим багатством) була обумовлена значним умістом органічних сполук як природного, так і антропогенного походження, що є типовим для малих поліських річок із площею басейну менше 1000 км^2. Загалом у р. Таль було визначено 53 види водоростей, представлених 55 внутрішньовидовими таксонами. Розподіл видів, різновидів і форм водоростей за відділами був таким: Bacillariophyta – 27, Chlorophyta – 14, Euglenozoa – 5, Cyanoprocaryota – 4, Miozoa – 2, Ochrophyta – 3. Значною кількістю видів характеризувався весняний планктон річки Таль – 34 види, представлені 35 внутрішньовидовими таксонами з номенклатурним типом виду включно. Провідну роль у формуванні видового багатства водотоку відігравали діатомові водорості (57% від загального їх числа), зелені (17%), евгленові та синьозелені (по 6%). Улітку фітопланктон досліджуваної акваторії р. Таль у межах Бородянського й Іванівського районів був бідним і нараховував лише 15 видів (16 внутрішньовидових таксонів), які належали до відділів Bacillariophyta (56%), Chlorophyta (32%), Euglenozoa і Cyanoprocaryota (по 6%). Ще меншу кількість видів було ідентифіковано впродовж осіннього періоду – 6. У видовому багатстві водотоку домінували Chlorophyta (по 50% загальної кількості видових та внутрішньовидових таксонів). Упродовж вегетаційних сезонів згаданого періоду найбільшу біомасу фітопланктону мали: Bacillariophyta – 40%, Chlorophyta, Ochrophyta – 14% та Miozoa – 13%. До видів-домінантів належала охрофітова водорість *Synura lapponica* Skuja (0,03 г/м^3) і вид, що належить до відділу Miozoa, – *Peridinium aciculiferum* Lemm. (0,02 г/м^3).

Порівняння отриманих даних за 2023–2024 рр. із літературними відомостями за 2004–2005 рр. (Кузьмінчук, 2005) засвідчує зниження видового багатства річкового фітопланктону, у першу чергу за рахунок помітного зниження частки діатомових водоростей (із 27 видів до 9). Збіднення, найімовірніше, зумовлене посиленням негативного антропогенного впливу воєнних дій, а також кліматичними змінами.

Родовий коефіцієнт (відношення числа видів до числа родів) на сучасному етапі функціонування річкової екосистеми склав 1,84. Такі порівняно низькі значення родового коефіцієнта вказують на те, що водотік зазнає хронічного негативного антропогенного впливу. Цей показник у 2004–2005 рр. становив 2,01. Отже, відмічається тенденція до деякого спрощення структури фітопланктону малої річки і домінування одновидових родів.

Отримані результати біоіндикаціного аналізу за індикаторними видами фітопланктону р. Таль можуть бути використані для подальшого моніторингу якості вод річкової екосистеми.

Висновки

Упродовж 2023–2024 рр. у фітопланктоні р. Таль виявлено 42 види та внутрішньовидові таксони водоростей із номенклатурним типом виду включно з 9 відділів. За складом провідних таксонів він є зелено-діатомово-евгленовий.

Порівняння отриманих даних із літературними відомостями за 2004–2005 рр. засвідчує зниження видового багатства річкового фітопланктону у першу чергу за рахунок помітного зниження частки діатомових водоростей (із 27 видів до 9). Збіднення, найімовірніше, зумовлене посиленням негативного антропогенного впливу, а також кліматичними змінами. Встановлено й спрощення таксономічної структури фітопланктону, на що вказує зменшення родового коефіцієнту.

У структурі фітопланктону річки Таль провідна роль належала і планктонно-бентосним (13) мешканцям, меншу представленість у складі водоростевих угруповань мали планктонні (10), бентосні (9) і ґрунтові форми (2). Наявність значної частки бентосних видів у складі планктону зумовлено особливостями мілководних ділянок малих річок, яким властиве вітрове перемішування і як наслідок – відрив бентосних і ґрунтових форм.

За температурною приуроченістю більшість видових і внутрішньовидових таксонів належить до евритермних – 60% від загального числа видів-індикаторів температурного режиму. Помітною є й частка теплолюбних форм, що, вірогідно, є результатом глобальних змін клімату.

За реофільністю 63% видів досліджуваної малої річки належать до стоячо-текучих (малорухливих) вод середньо-забезпечених киснем, 33% – до стоячих форм із порівняно низькою насиченістю киснем, 4% – до текучих форм. Це відповідає місцю існування фітопланктону – мілководна річка із низькою інтенсивністю фотосинтетичної аерації.

Більшість видів планктонних водоростей р. Таль є прісноводними формами – 24–64% від числа індикаторних видів за відношенням до солоності вод. Присутність солелюбних форм (олігогалобів-галофілів 20% – 8, мезогалобів 4% – 2) є результатом зростання мінералізації унаслідок осушення, що призводить до зміни різноманіття водоростей і є одним із кліматичних чинників, який впливає на формування альгофлори.

За приуроченістю до pH у р. Таль переважали групи індиферентів (71%) та алкаліфілів (11%), водночас помітною була й частка ацидофілів (13%). Це вказує на помірний вплив ацидофікації і процеси незначного закиснення.

З'ясовано, що переважна більшість водоростей водотоку за сапробністю належить до III класу якості вод – «вода задовільної якості».

Список використаної літератури

Афанасьєв С.О. Проблеми і розвиток досліджень екологічного стану гідроекосистем України в аспекті імплементації директив ЄС в галузі довкілля. *Гідробіол. журн.* 2018. 54. № 6. С. 3–17.

Бабіченко В.М., Ніколаєва В.М., Гущина Л.М. Зміни температури повітря на території України наприкінці XX та на початку XXI століття. *Укр. геогр. журн.* 2007. № 4. С. 3–12.

Кузьмінчук Ю.С. Фітопланктон приток р. Тетерів. *Вісник державного агроекологічного університету.* Житомир, 2005. 1 (14). С. 262–269.

Маринич О.М. Географічна енциклопедія України. Київ : Українська радянська енциклопедія ім. М.П. Бажана, 1989. 427 с.

Мальцев В.І., Карпова Г.О., Зуб Л.М. Визначення якості води методами біоіндикації: науково-методичний посібник. Київ : Науковий центр екомоніторингу та біорізноманіття мегаполісу НАН України, ІНЕКО Національного екологічного центру України, 2011. 112 с.

Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / за ред. В.Д. Романенка. Київ : ЛОГОС, 2006. 408 с.

Постанова Кабінету Міністрів України від 19 вересня 2018 р. № 758 «Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу вод» [Електронний ресурс]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/758-2018-п (дата звернення 22.10.2024).

Проект Стратегії сталого розвитку України до 2030 року. Проект Закону України від 07.08.2018 № 9015 [Електронний ресурс]. URL: UNDP_Strategy_v06-optimized.pdf (дата звернення 29.10.2024).

Barynova S.S., Medvedeva L.A., Nazimova O.V. Biodiversity of algae-indicators of the environment. Tel Aviv : Piles Studio, 2006. 498 p.

Deng J., Qin B., Sarvala J., Salmaso N., Zhu G., Ventelä A.-M., Zhan Y., Gao G., Nurminen L., Kirkkala T., Tarvainen M., & Vuorio K. Phytoplankton assemblages respond differently to climate warming and eutrophication: a case study from Pyhäjärvi and Taihu. *Journal of Great Lakes Research.* 2016. 42 (2). P. 386–396. https://doi.org 10.1016/j.jglr.2015.12.008.

Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway, 2020. [Електронний ресурс] URL: http://www.algaebase.org (дата звернення 30.10.2024).

Ignatiades L. Taxonomic Diversity, Size-Functional Diversity, and Species Dominance Interrelations in Phytoplankton Communities: a Critical Analysis of Data Interpretation. *Mar. Biodivers.* 2020. № 50 (4). P. 1–9. https://doi.org/10.1007/s12526-020-01086-4.

Pantle R., Buck H. Die biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse. *Gas- und Wasserbach.* 1955. Vol. 96. № 18. 604 p.

Shelyuk Yu.S. Peculiarities of Phytoplankton Formation and Functioning in Small Water Reservoirs. *International Journal on Algae.* 2024. № 26 (3). P. 273–284. https://doi.org 10.1615/ InterJAlgae.v26.i3.50.

Shelyuk Y.S., Astahova L.Y. Phytoplankton succession in the anthropogenic and climate ecological transformation of freshwater ecosystems. *Biosystems Diversity.* 2021. № 29 (2). P. 119–128. https:// doi.org/10.15421/012116.

Shelyuk Yu.S., Shcherbak V.I. Phytoplankton Structural and Functional Indices in the Rivers of the Pripyat' and Teterev Basins. Hydrobiol. *Jornal.* 2018. V. 54. № 3. P. 10–23.

Sladeček V. System of water quality from the biological point of view. *Ergebnisse der Limnol.* 1973. V. 7. № 1/4. P. 1–218.

Tsarenko P.M., Wasser S.P., Nevo E. Algae of Ukraine: diversity, nomenclature, taxonomy, ecology and geography. Cyanoprocaryota, Euglenophyta, Chrysophyta, Xanthophyta, Raphidophyta, Phaeophyta, Dinophyta, Cryptophyta, Glaucocystophyta, and Rhodophyta. Eds. Ruggell : Ganter Verlag, 2006. Vol. 1. 713 p.

Tsarenko P.M., Wasser S.P., Nevo E. Algae of Ukraine: diversity, nomenclature, taxonomy, ecology and geography. Bacillariophyta. Eds. Ruggell : Ganter Verlag. 2009. Vol. 2. 413 p.

Tsarenko P.M., Wasser S.P., Nevo E. Algae of Ukraine: diversity, nomenclature, taxonomy, ecology and geography. Chlorophyta. Eds. Ruggell : Ganter Verlag. 2011. Vol. 3. 511 p.

References

Afanasiev, S.O. (2018). Problemy i rozvytok doslidzhen ekolohichnoho stanu hidroekosystem Ukrainy v aspekti implementatsii dyrektyv YeS v haluzi dovkillia [Problems and development of research on the ecological state of hydroecosystems of Ukraine in the aspect of implementation of EU directives in the field of environment]. *Hidrobiol. Zhurn.* [Hydrobiol. Jornal], 54 (6), 3–17 [in Ukrainian].

Babichenko, V.M., Nikolaieva, V.M., & Hushchyna, L.M. (2007). Zminy temperatury povitria na terytorii Ukrainy naprykintsi KhKh ta na pochatku KhKhI stolittia [Air temperature changes in the territory of Ukraine at the end of the 20th and the beginning of the 21st century]. *Ukr. heohr. zhurn* [Ukraine geogr. journal], 4, 3–12 [in Ukrainian].

Kuz'minchuk, Yu.S. (2005). Fitoplankton prytok r. Teteriv [Phytoplankton tributary of the river Teteriv]. *Visnyk derzhavnoho ahroekolohchnoho universytetu [Bulletin of the State Agroecological University],* 1 (14), 262–269 [in Ukrainian].

Marynych, O.M. (ed.) (1989). Heohrafichna entsyklopediya Ukrayiny. [Geographical encyclopedia of Ukraine]. K. Ukrainian Soviet Encyclopedia named after M. P. Bazhana [in Ukrainian].

Maltsev, V.I., Karpova, H.O., & Zub, L.M. (2011). Vyznachennia yakosti vody metodamy bioindykatsii [Determination of water quality by bioindication methods]: naukovo-metodychnyi posibnyk. K. : Naukovyi tsentr ekomonitorynhu ta bioriznomanittia mehapolisu NAN Ukrainy, Nederzhavna naukova ustanova Instytut ekolohii (INEKO) Natsionalnoho ekolohichnoho tsentru Ukrainy [in Ukrainian].

Metody hidroekolohichnykh doslidzhen poverkhnevykh vod [Methods of hydroecological research of surface waters] (2006). / za red. V. D. Romanenka. Kyiv : LOHOS [in Ukrainian].

Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 19 veresnia 2018 r. № 758 «Pro zatverdzhennia Poriadku zdiisnennia derzhavnoho monitorynhu vod» [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of September 19, 2018 No. 758 «On Approval of the Procedure for State Water Monitoring] [Elektronic resource]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/758-2018-p (access date 22.10.2024) [in Ukrainian].

Proekt Stratehii staloho rozvytku Ukrainy do 2030 roku. Proekt Zakonu Ukrayiny vid 07.08.2018 № 9015 (2018). [Project of the Sustainable Development Strategy of Ukraine until 2030. Draft Law of Ukraine dated August 7, 2018 No. 9015]. [Elektronic resource]. URL: UNDP_Strategy_v06-optimized.pdf. (access date 29.10.2024) [in Ukrainian].

Barynova, S.S., Medvedeva, L.A., & Anisymova, O.V. (2006). Biodiversity of algae-indicators of the environment. Tel Aviv : Piles Studio [in English].

Deng, J., Qin, B., Sarvala, J., Salmaso, N., Zhu, G., Ventelä, A.-M., Zhang, Y., Gao, G., Nurminen, L., Kirkkala, T., Tarvainen, M., & Vuorio, K. (2016). Phytoplankton assemblages respond

differently to climate warming and eutrophication: a case study from Pyhäjärvi and Taihu. *Journal of Great Lakes Research*, 42 (2), 386–396. https://doi.org 10.1016/j.jglr.2015.12.008 [in English].

Guiry, M.D., & Guiry, G.M. (2024). AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. [Electronic resource] URL: http://www.algaebase.org. (access date 30.10.2024) [in English].

Ignatiades, L. (2020). Taxonomic Diversity, Size-Functional Diversity, and Species Dominance Interrelations in Phytoplankton Communities: a Critical Analysis of Data Interpretation. *Mar. Biodivers*, 50 (4), 1–9. https://doi.org/10.1007/s12526-020-01086-4 [in English].

Pantle, R., & Buck, H. (1955). Die biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse. Gas- und Wasserbach, 96 (18) [in English].

Shelyuk, Yu.S. (2024). Peculiarities of Phytoplankton Formation and Functioning in Small Water Reservoirs. *International Journal on Algae*, 26 (3), 273–284. https://doi.org 10.1615/InterJAlgae. v26.i3.50 [in English].

Shelyuk, Y.S., & Astahova, L.Y. (2021). Phytoplankton succession in the anthropogenic and climate ecological transformation of freshwater ecosystems. *Biosystems Diversity*, 29 (2), 119–128. https://doi.org/10.15421/012116 [in English].

Shelyuk, Yu.S., & Scherbak, V.I. (2018). Phytoplankton structural and functional indices in the rivers of the Pripyat' and Teterev basins. *Hydrobiological Journal,* 54 (3), 10–23 [in English].

Sladeček, V. (1986). Diatoms as indicators of organic pollution. Acta Hydrochim. *Hydrobiol. J*, 14 (5), 555–566. https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v54.i3.10 [in English].

Tsarenko, P.M., Wasser, S.P., & Nevo, E. (2009). Algae of Ukraine: diversity, nomenclature, taxonomy, ecology and geography. Bacillariophyta. Eds. Ruggell : Ganter Verlag, 2 [in English].

Tsarenko, P.M., Wasser, S.P., & Nevo, E. (2006). Algae of Ukraine: diversity, nomenclature, taxonomy, ecology and geography. Cyanoprocaryota, Euglenophyta, Chrysophyta, Xanthophyta, Raphidophyta, Phaeophyta, Dinophyta, Cryptophyta, Glaucocystophyta, and Rhodophyta. Eds. Ruggell : Ganter Verlag, 1 [in English].

Tsarenko, P.M., Wasser, S.P., & Nevo, E. (2011). Algae of Ukraine: diversity, nomenclature, taxonomy, ecology and geography. Chlorophyta. Eds. Ruggell : Ganter Verlag, 3 [in English].

Отримано: 04.11.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

ГЕОГРАФІЯ

УДК 502:504.61(477.42)
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.3

СУЧАСНИЙ АНТРОПОГЕННИЙ ВПЛИВ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ ЖИТОМИРСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Р. П. Власенко[1], Я. П. Квацало[2], В. С. Костюк[3], В. В. Цимбалюк[4]

У цій статті розглянуто динаміку змін природного середовища Житомирської області під впливом окремих факторів антропогенного навантаження за останні декілька років. На підставі аналізу викидів забруднюючих речовин, встановлено, що найбільшу частку викидів у атмосферу дають пересувні джерела. Із шкідливих компонентів переважають оксиди Карбону (73%), оксиди Нітрогену (13%), неметанові леткі органічні сполуки (11%), сажа (1,6%), а також Сульфур оксид (IV) (1,4%). Серед стаціонарних джерел найбільші викиди в атмосферне повітря області здійснює переробна промисловість, сільське, лісове та рибне господарство, а також добувна галузь і розроблення кар'єрів. Основними забруднювачами водних об'єктів регіону є житлово-комунальні підприємства. У водах річок зафіксовані перевищення ГДК по Феруму, Мангану, ХСК, БСК5. Радіаційний стан вод Житомирської області за вмістом ^{90}Sr і ^{137}Cs є стабільним і не перевищує норми. Значна сільськогосподарська трансформація території області негативно впливає на якість ґрунтів і спричинює їх деградацію. Серед деградаційних процесів переважають ерозія (вітрова та водна) та заболочування. Останні тридцять років спостерігається помітна тенденція зниження вмісту гумусу в ґрунтах області. Середнє його значення зараз дорівнює 2,07%. Також

[1] кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: vlasenko_r76@ukr.net
ORCID: 0000-0002-3743-4406
[2] студентка кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: k.yana26012002@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3743-4406
[3] кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: kostyuk_vs@yahoo.com
ORCID: 0000-0001-5504-4084
[4] кандидат хімічних наук, доцент,
викладач-методист циклової комісії природничих дисциплін та математики
(КЗ «Уманський гуманітарно-педагогічний фаховий коледж ім. Т. Г. Шевченка Черкаської обласної ради», м. Умань)
e-mail: wwala1975@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2509-6956

в ґрунтах Житомирщини фіксується дуже низький рівень забезпеченості рухомими формами Калію (середнє значення 40,0 мг/кг ґрунту) та легко гідролізованого Нітрогену (89 мг/кг ґрунту). Важливою проблемою для Житомирської області є підкислення ґрунтів. Середнє значення даного показника в області становить 5,5. Майже 57% орних земель області припадає на кислі ґрунти (pH<5,60). За минулі десятиліття радіаційне забруднення ґрунтів області значно зменшилося: понаднормове забруднення ^{137}Cs становить 0,1%, а ^{90}Sr – 0,5% від обстеженої площі. Значної трансформації внаслідок господарської діяльності людини зазнають біотичні ресурси. На території Житомирської області виділено 286 видів рослин і 134 види тварин, яким загрожує небезпека. Негативно вплинули на навколишнє середовище області військові дії. Від початку збройної агресії росії, в регіоні зафіксовано 17 злочинів проти довкілля, а загальна сума завданої шкоди дорівнює майже 15 млрд грн.

Ключові слова: *Житомирська область, навколишнє середовище, антропогенний вплив, забруднення.*

CURRENT ANTHROPOGENIC IMPACT ON THE ENVIRONMENT OF THE ZHYTOMYR REGION

R. P. Vlasenko, Ia. P. Kvatsalo, V. S. Kostiuk, V. V. Tsymbaliuk

This article discusses the dynamics of changes in the natural environment of the Zhytomyr region under the influence of individual factors of anthropogenic load over the past few years. Based on the analysis of pollutant emissions, it was established that the largest part of emissions into the atmosphere comes from mobile sources. The predominant harmful components are Carbon oxides (73%), Nitrogen oxides (13%), non-methane volatile organic compounds (11%), soot (1.6%), and Sulfur oxide (IV) (1.4%). Among stationary sources, the largest emissions into the atmospheric air of the region come from the processing industry, agriculture, forestry and fisheries, the mining industry and quarrying. The main polluters of water bodies in the region are housing and communal services. Exceedances of the maximum permissible concentrations for Ferum, Mangan, KhSK, and BSK5 were recorded in river waters. The radiation state of the waters of the Zhytomyr region in terms of the content of 90Sr and 137Cs is stable and does not exceed the norm. Significant agricultural transformation of the region's territory negatively affects the quality of soils and entails their degradation. Among the degradation processes, erosion (wind and water) and waterlogging predominate. In the last thirty years, there has been a noticeable trend towards a decrease in the humus content in the soils of the region. Its average value is now 2.07%. It is also recorded that the soils of the Zhytomyr region contain very low level of provision with mobile forms of potassium (average value 40.0 mg/kg of soil) and easily hydrolyzed nitrogen (89 mg/kg of soil). An important problem for the Zhytomyr region is soil acidification. The average value of this indicator in the region is 5.5. Almost 57% of the region's arable land falls on acidic soils (pH <5.60). Over the past decades, radiation contamination of soils in the region has decreased significantly: overtime contamination with 137 Cs is 0.1%, and 90Sr – 0.5% of the surveyed area. Biotic resources undergo significant transformation as a result of human economic activity. On the territory of the Zhytomyr region, 286 species of plants and 134 species of animals that are in danger have been identified. Military actions had a negative impact on the environment of the region. Since the beginning of Russia's armed aggression, 17 crimes against the environment have been recorded in the region, and the total amount of damage caused is almost 15 billion UAH.

Key words: *Zhytomyr region, environment, anthropogenic influence, pollution.*

Вступ

Зараз на Землі відбуваються різні природні катаклізми (глобальне потепління, тривалі посухи, масштабні паводки тощо), які негативно впливають на стан навколишнього середовища. Водночас значний вплив на довкілля здійснює і людство, змінюючи його для своїх потреб. Упродовж усього XX ст. – початку XXI ст. це призвело до глобального погіршення стану планети. Зважаючи на це, цивілізовані держави світу спрямовують політику на охорону навколишнього природного середовища. Не виключенням є і Україна. До цього часу Житомирська область залишається аграрно-індустріальним регіоном. Промисловий комплекс області відноситься до середньопотужних. Динаміка його розвитку є достатньо стабільною навіть під час російсько-української війни. У структурі промисловості Житомирщини провідне місце займають добувна та обробна промисловість, виробництво й розподілення електроенергії, газу і води. Житомирська область має

розвинуте сільськогосподарське виробництво: вирощування зернових і зернобобових культур, картоплі, цукрових буряків, овочів, виробництво молока, м'яса та яєць. За обсягами сільськогосподарської продукції вона посідає провідне місце серед областей країни. У зв'язку з цим вивчення стану навколишнього середовища регіону є надзвичайно актуальною проблемою.

Питання дослідження стану навколишнього середовища Житомирської області є актуальним для багатьох дослідників вчених. Особлива увага приділяється вивченню ландшафтної структури області (Нестерчук, 2016; Lavryk et al., 2022), радіаційного забруднення території (Кашпаров та ін., 2022; Пацева та ін., 2023), оцінці рівня техногенного навантаження (Валерко і Герасимчук, 2017) та стану екологічної безпеки (Смілий та ін., 2021; Пацева та ін., 2023).

Метою статті було проаналізувати сучасний антропогенний вплив на територію Житомирської області на основі офіційних даних різноманітних екологічних організацій та установ.

Матеріал і методи

Вихідними матеріалами для аналітичного огляду сучасного стану навколишнього середовища Житомирської області стали власні польові дослідження авторів, які здійснювалися на її території упродовж 2020–2024 рр., а також дані різноманітних організацій і установ м. Житомира та області (Головного управління статистики у Житомирській області та Управління екології та природних ресурсів Житомирської облдержадміністрації). При виконанні дослідження застосовувалися географічний та системний наукові підходи, використовувалися такі наукові методи, як аналіз, синтез, узагальнення, картографічний, літературний, статистичний тощо.

Результати

У зв'язку з введенням у країні воєнного стану подання статистичної звітності носить рекомендаційний характер, тому дані щодо стану атмосферного повітря Житомирської області за 2022 і 2023 роки не оприлюднюються. Для проведення аналізу забруднення атмосферного повітря в області було обрано довоєнні роки.

Забруднення атмосферного повітря здійснюють пересувні та стаціонарні джерела, динаміка викидів від яких в атмосферне повітря Житомирської області за минулі 20 років наведена у таблиці 1.

Аналізуючи дані таблиці 1, потрібно відмітити:

• за період 2000–2021 роки обсяги викидів в атмосферу області не мали чіткої динаміки. Це стосується як обсягів загаль-

Таблиця 1

Обсяги викидів в атмосферу Житомирської області, тис. т.
(Регіональна…, 2024; Статистичний…, 2024)

Роки	**Викиди в атмосферне повітня, тис. т**			**Щільність викидів у розрахунку на 1 км^2, кг**	**Обсяги викидів у розрахунку на 1 особу, кг**	**Обсяг викидів на одиницю ВРП (тис. т на млн. грн.)**
	Всього	**у тому числі**				
		стаціонарними джерелами	**пересувними джерелами**			
2000	61,80	12,3	49,5	2072,1	43,45	0,0046
2010	87,49	18,38	69,11	2941,2	68,41	0,0039
2011	86,81	19,01	67,79	2913,1	68,19	-
2012	85,74	18,49	67,25	2882,3	67,34	0,0036
2013	88,44	17,21	71,23	2965,1	70,05	0,0035
2014	77,42	10,93	66,49	2597,9	61,64	0,0026
2015	69,70	8,98	60,72	2336,8	55,7	0,0018
2016	69,87	9,27	60,57	2343,6	55,9	0,0015
2017	74,45	10,33	64,12	2498,3	60,01	0,0012
2018	72,97	13,0	59,97	2448,7	59,28	0,0009
2019	73,44	12,7	60,74	2464,4	60,19	0,00086
2020	53,9	11,8	42,1*	1807,1	45,77	0,00058
2021	58,7	11,9*	46,8*	1968,02	49,85	-**

*Примітка: * – дані станом на 01.08.2021 року; ** – значення ВПР за 2021 рік на сайті обласного управління статистики відсутнє.*

них викидів, так і окремо по стаціонарних і пересувних джерелах;

• значне зниження обсягів загальних викидів шкідливих речовин спостерігається протягом двох останніх років. Але у 2021 році відбулося збільшення викидів на 8,2% у порівнянні з 2020 роком;

• найбільшим забруднювачем атмосфери в Житомирській області є пересувні джерела;

• викиди забруднюючих речовин від пересувних джерел в останні два роки суттєво зменшились. Але в 2021 році вони зросли на 10,05 % (на 4,7 тис. т) у порівнянні з 2020 роком. Серед шкідливих компонентів, які викидаються в повітря автотранспортом переважають оксиди Карбону (73%), оксиди Нітрогену (13%), неметанові леткі органічні сполуки (11%), сажа (1,6%), а також Сульфур оксид (IV) (1,4%). Це пояснюється експлуатацією технічно застарілого автопарку, зростанням кількості приватного автотранспорту, аварійним станом доріг в області, використанням низькоякісного палива (Валерко і Герасимчук, 2017);

• викиди забруднюючих речовин від стаціонарних джерел в останні два роки також мають тенденцію до зменшення.

У таблиці 1 наведені такі важливі узагальнюючі показники, як обсяг забруднюючих речовин в кілограмах в розрахунку на одного мешканця області та на 1 км^2 території. Зміни даних показників за період 2000–2021 роки також не мали чіткої динаміки, значне зниження показників спостерігається протягом двох останніх років. Станом на 2021 рік щільність викидів у розрахунку на одного мешканця області дорівнювала 49,85 кг/особу, а на 1 км^2 території – 1968,02 кг/км^2. Від стаціонарних джерел забруднення щільність викидів становила (Регіональна…, 2024):

• на 1 км^2 території – 0,398 т/км^2, а середнє значення по Україні – 3,89 т/км^2. Отже, область займає 22 місце по Україні;

• на одного мешканця області 10,02 кг/особу, а середнє значення по Україні – 54,2 кг/особу. Отже, область займає 20 місце по Україні.

Від стаціонарних джерел в атмосферне повітря Житомирської області у 2021 році надійшло 11893,1 т викидів шкідливих речовин, що лише на 0,1 тис. т менше ніж у попередньому році. Серед викидів наявні такі шкідливі парникові гази як метан (3114,3 т) та сполуки Нітрогену (1456,5 т), а також Карбон діоксид (0,7 млн т).

За видами економічної діяльності найбільшими забруднювачами атмосферного повітря в області у 2021 році, як і в минулі роки, було визнано:

• переробну промисловість – 28,65% від загального обсягу викидів;

• сільське, а також лісове та рибне господарство – 28,58%;

• добувну промисловість і розроблення кар'єрів – 18,65%;

• транспорт, а також складське господарство, кур'єрську та поштову діяльність – 9,47%.

Внаслідок постачання електроенергії, газу та кондиційованого повітря в повітря області викидається лише 3,53% від загального обсягу викидів. Найменший вплив на якість повітря має невиробнича сфера: такі галузі як надання комунальних послуг, фінансова діяльність, мистецтво, спорт, відпочинок і розваги (додаток В).

Основними забруднювачами атмосфери області у 2021 році названо одинадцять промислових підприємств, серед яких найбільше обсягів шкідливих викидів припадає на підприємства ТОВ «ОБІО» та Бердичівське ЛВУМГ «Оператор ГТС України» (табл. 2). Значну корективу у забруднення навколишнього середовища області, зокрема атмосфери, у 2022–2023 роках внесли військові дії російської армії.

Компонентний склад викидів стаціонарними джерелами такий: найбільша кількість – це тверді суспендовані частинки та метан, частка яких становила 27,28 та 26,19% від загального обсягу викидів відповідно. Також наявні викиди сполук Нітрогену – 16,87%, оксиду Карбону – 16,33% та сполук Сульфуру – 9,13% (Регіональна…, 2024).

За районами області у 2021 році викиди в повітряний басейн від стаціонарних джерел забруднення різняться. Найбільший обсяг викидів припадає на Житомирський район, який викидає 35,67% (4242,1 т) забруднюючих речовин від загальних викидів по області (рис. 1). Тут розміщується ТОВ «ОБІО» (виробництво мінеральних виробів (неметалевих)), викиди якого складають 26,78% від загальних викидів по району. На другому місці з показником 28,85% (3431,6 т) знаходиться Коростенський район. На останньому місці розташовується Бердичівський район – 15,04% (1788,7 т). У цьому районі розміщується один із основних забруднювачів атмосфери області – Бердичівське ЛВУМГ «Оператор

Таблиця 2

Основні забруднювачі повітря Житомирської області, 2021 рік [2]

№ з/п	Назва об'єкта	Частка викидів забруднюючої речовини		
		усього викидів, т/рік	до загал. обсягу викидів області, %	до загал. обсягу викидів н.п., (району) %
1	ТОВ "ОБІО"	1104,9	9,47	26,78
2	ТОВ "Оператор ГТС України" Бердичівське ЛВУМГ	1016,6	8,71	57,47
3	ТОВ "АГРОВЕСТ ГРУП"	513,4	4,40	21,12
4	ПП "ГАЛЕКС-АГРО"	465,7	3,99	19,15
5	ТОВ "СІГНЕТ-МІЛК"	421,9	3,61	10,22
6	ПАТ "ТРК "ГРАНІТ""	420,1	3,60	12,54
7	АТ "Малинський камендробильний завод"	355,7	3,05	10,62
8	ТОВ "ЮНІГРАН"	352,8	3,02	10,53
9	ТОВ "ЦЕРСАНІТ ІНВЕСТ"	291,5	2,50	11,99
10	ВП ПРАТ "Коростенський завод МДФ"	193,3	1,66	5,77
11	КП "Житомиртеплокомуненерго" Житомирської міської ради	191,8	1,64	4,65
12	Всього по області	11673,8		

ГТС України», на частку якого припадає 57,47% від загальних викидів по району.

Житомирська область належить до областей України із значними запасами місцевих водних ресурсів. На одного мешканця області припадає 3–7 тис. м^3 на рік ресурсів місцевого стоку. Це значно більше ніж по країні.

На території області великі транзитні річки (транзитний стік) відсутні. Середній показник річкового стоку дорівнює 3300 млн. м^3, з них 2800 млн. м^3 формується на території області. Водність рік різниться за сезонами року та адміністративним районами області. В північній частині області водність річок в 1,5–2 рази більше ніж у південних. Найбільша частка стоку річок (до 70%) припадає на весняну повінь та літні паводки. Водозабезпеченість в середній по водності рік дорівнює 2,6 тис. м^3/особу, а в маловодний рік – 0,9 тис. м^3/особу (Регіональна..., 2024). Розташування Житомирської області

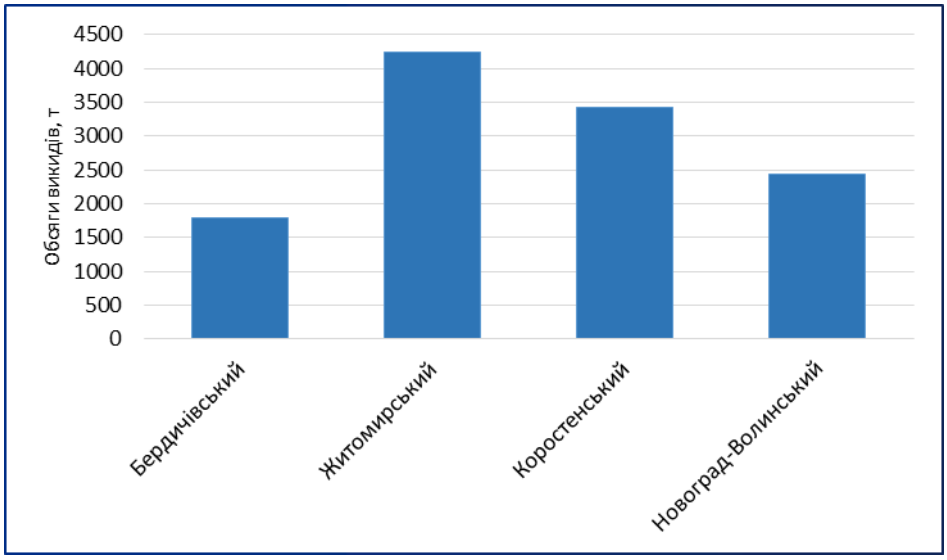


Рис. 1. Викиди від стаціонарних джерел по районах Житомирської області станом на 2021 рік

Джерело: побудовано авторами за (Статистичний..., 2024)

в межах Українського щита обумовлює незначні запаси підземних вод. За сумарною забезпеченістю водними ресурсами Житомирська область займає одне із останніх місць в країні.

Загальний водозабір в Житомирській області у 2022 році дорівнював 85,23 млн м^3. Це на 11,08 млн м^3 менше, ніж у 2021 році, коли забір води становив 96,31 млн м^3. З 2019 року в області спостерігається досить суттєве зменшення обсягів водозабору. Так, у 2019 році було забрано 110,7 млн м^3 свіжої води, а у 2022 році менше на 25,47 млн м^3 (рис. 2).

Структура водокористування в Житомирській області станом за 2022 рік наступна: 42,2% (35,95 млн. м^3) припадає на сільське господарство, 37,2% (31,73 млн. м^3) – на житлово-комунальне господарство, 16,4% (13,98 млн. м^3) – на промисловість, 4,2% (3,57 млн. м^3) – на інші галузі (Регіональна…, 2024). Отже, більша частина води використовується у сільському та житлово-комунальному господарствах.

У 2022 році водовідведення у поверхневі водні об'єкти Житомирської області становило 52,61 млн м^3 стічних вод. Це менше на 10,75 млн м^{3,} ніж у 2021 році. Структура стічних вод у 2022 році аналогічна до попередніх років і становить: нормативно чистих без очищення вод – 26,89 млн м^3, нормативно очищених вод – 24,43 млн м^3, забруднених вод – 1,105 млн м^3 (Екологічний…, 2024). Отже, частка забруднених вод у структурі стічних вод незначна. Але, якщо простежити динаміку скиду забруднених вод, то чіткої тенденції до їх зменшення не простежується (рис. 3).

Основними забруднювачами водних об'єктів області, як і у попередні роки, є житлово-комунальні підприємства, які скидають 80,7% (1,041 млн. м^3) стічних вод.

Основні забруднювачі водних об'єктів області у 2022 році наступні (Регіональна…, 2024):

- річка Тетерів від г/п Житомир до гирла р. Ірша (водогосподарська ділянка М5.1.2.06): підприємство «Водоканал» Коростишівської ТГ, «Іршанське комунальне підприємство» Іршанської ТГ; військова частина міста Радомишль та Макарівська квартирно-експлуатаційна частина Городоцької ТГ, Хорошівське ЖКП;
- річка Тетерів від витоку до г/п Житомир (водогосподарська ділянка М5.1.2.05): ТОВ «Комплекс екологічних споруд» міста Бердичів, КП «Озерне» Новогуйвинської селищної ради, КНП «ОМЦВІР» міста Житомир;
- річка Гнилоп'ять: МКП «Бердичів-комунсервіс»;
- річка Тетерів та її притока річка Кам'янка: КП «Житомирводоканал» (аварійний скид стічних каналізаційних вод);
- річка Прип'ять від г/п Мозир до гирла (в межах України) (водогосподарська ділянка М.5.1.4.41): КП «Водоканал» Гладковицької сільради;
- річка Случ від гирла річки Хомора до гирла річки Корчик (водогосподарська ділянка М.5.1.4.47): ПАТ «Чижівська паперова фабрика»;

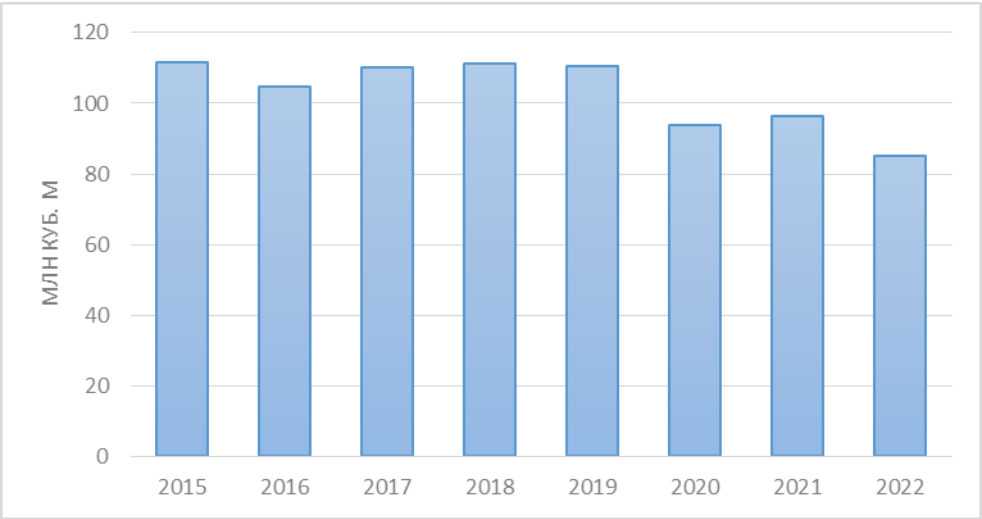


Рис. 2. Забір свіжої води у Житомирській області за 2015–2022 роки

Джерело: побудовано авторами за (Регіональна…, 2024; Управління…, 2024)

Рис. 3. Динаміка та структура зворотних вод за 2018–2022 роки
Джерело: побудовано авторами за (Екологічний..., 2024; Статистичний..., 2024)

- річка Уборть від витоку до кордону держави (водогосподарська ділянка М.5.1.4.51): виробничий підрозділ Локомотивне ДЕПО Коростень (АТ «Українська залізниця»).

За результатами державного моніторингу вод у 2022 році у річках Житомирської області було зафіксовано такі випадки перевищень ГДК (Смілий та ін., 2021; Регіональна..., 2024:

- річка Тетерів: по ХСК – 12, по БСК5 – 2, по Феруму – 12;
- річка Ірша: по ХСК – 19 випадків, по Феруму – 12, по Мангану – 11;
- річка Возня: по ХСК – 10 випадків, по Феруму – 10, по Мангану – 8;
- річка Случ: по ХСК – 12 випадків, по БСК5 – 1, по Феруму – 12, по Мангану – 6;
- річка Уж: по ХСК – 11 випадків, по Феруму – 11, по Мангану – 5;
- річка Гнилоп'ять: по ХСК – 12 випадків, по Феруму – 7, по Мангану – 5, прозорість – 11 (рис. 4);

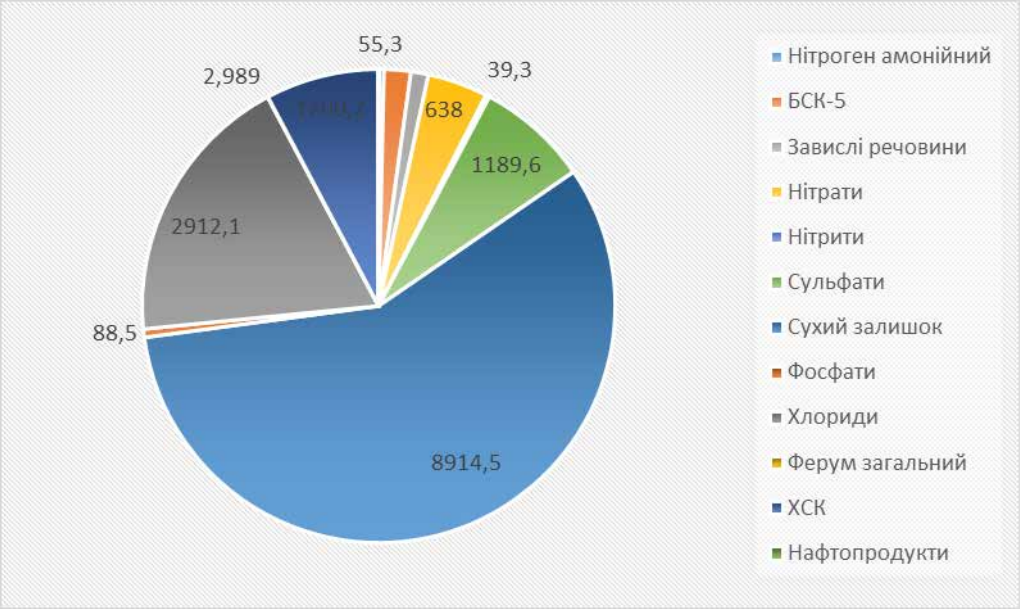


Рис. 4. Склад забруднюючих речовин у зворотних водах у 2022 році, т/рік
Джерело: побудовано авторами за (Регіональна..., 2024)

• річка Уборoть: по ХСК – 7 випадків, по БСК5 – 2, по Феруму – 10, по Мангану – 4.

Склад забруднюючих речовин у зворотних водах у 2022 році, як і у попередні роки, наступний: сухий залишок (57%), хлориди (19%), ХСК (8%), сульфати (8%), нітрати (4%) (рис. 4).

Радіологічний стан поверхневих водних об'єктів області в останні роки характеризується як стабільний. Вміст у воді радіонуклідів є набагато нижчим від встановлених нормативів (Екологічний…, 2024):

• по стронцію-90: річка Уборть – 0,0 до 0,324 пКи/дм³; річка Уж – 0,027–0,270 пКи/дм³; річка Ірша – 0,0–0,27 пКи/дм³. Допустимо ю нормою вважається 54,0 пКи/дм³.

• по цезію-137 у всіх пунктах спостережень показник нижче діапазону вимірювання приладів.

Земельний фонд Житомирської області на початок 2023 року становить 2982,7 тис. га. Більша частина земельного фонду припадає на сільськогосподарські підприємства – 559,2 тис. га, лісогосподарські підприємства – 1048,1 тис. га, землі громадян – 760,4 тис. га, землі державної власності, що не надані у користування або власність (загального користування, запасу, резервного фонду) – 470,4 тис. га. Структура земельного фонду за основними видами угідь в останні десятиліття практично не змінюється і станом на 2023 рік наступна (Екологічний…, 2024):

• сільськогосподарські угіддя – 1510,1 тис. га (50,6%);

• ліси та лісовкриті землі – 1123,4 тис. га (37,7%);

• природна чагарникова рослинність – 55,2 тис. га (1,9%);

• води – 48,6 тис. га (1,6%);

• землі без рослинного покриву (з незначним покривом) – 38,3 тис. га (1,3%);

• інші землі – 161,1 тис. га (5,4%).

Отже, у структурі земельного фонду області 50,6% припадає на сільськогосподарські угіддя, що значно менше ніж середнє значення по Україні (70,8%). Це обумовлено тим, що у північній та центральній частинах області значні площі займають дерново-підзолисті ґрунти, які мають низьку родючість.

У структурі сільськогосподарських угідь найбільша частка припадає на ріллю – 74%, а на такі еколого стабілізуючі угіддя як перелоги та сіножаті лише 8% і 2,1% відповідно (рис. 5).

Розораність сільськогосподарських угідь різниться по районах області: у лісостеповій частині вона становить 74%, у перехідній зоні – 47%, а у Поліській зоні – 29%. Це пояснюється природною родючістю ґрунтів.

Важливим екологічним показником є вміст органічної речовини (гумусу) у ґрунтах. Найбільший вміст гумусу в ґрунтах області фіксувався у 1966–1970 роках, а з 1981–1985 років починається його значне зниження. Середнє значення вмісту гумусу у ґрунтах області дорівнює

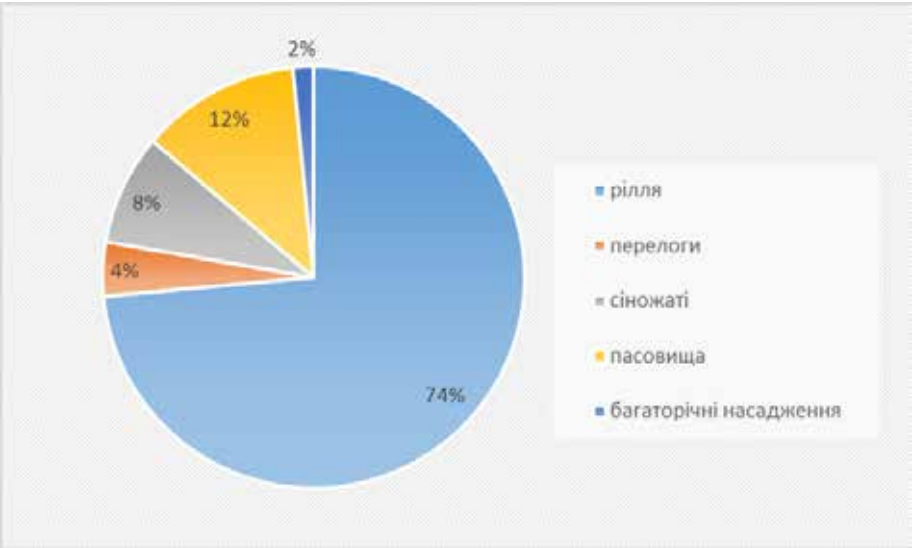


Рис. 5. Структура сільськогосподарських угідь Житомирської області, % від площі сільськогосподарських угідь

Джерело: побудовано авторами за (Екологічний…, 2024)

2,07% (Екологічний…, 2024), а в ґрунтах України – 3,07% (Статистичний…, 2024). Найбільші площі в області займають ґрунти з низьким умістом гумусу (49,1%) та підвищеним (26,0%). Натомість ґрунтів з високим та дуже високим вмісту гумусу не виявлено (Регіональна…, 2024). Важливим ресурсом для забезпечення відтворення гумусу є органічні добрива. В останні роки кількість органічних добрив, які вносяться на 1 га сільськогосподарських угідь, в області незначна. У 2017 і 2018 роках було внесено по 0,5 т/га, у 2019 році – 0,6, а в 2020 році – 0,7. Але слід зазначити, що баланс гумусу у 2016–2020 роках в Житомирський області додатній (+0,20 т/га), тоді як середнє значення по Україні від'ємне: – 0,21 т/га (Статистичний…, 2024).

Важливе значення для підвищення родючості ґрунту має вміст в ньому таких елементів як Нітроген, Фосфор, Калій. Середній вміст легкогідролізованого Нітрогену в ґрунтах Житомирщини складає 89 мг/кг ґрунту, що відповідає дуже низькому рівню забезпеченості. Найбільші площі в області займають ґрунти з дуже низьким умістом легкогідролізованого Нітрогену (64,0%) (Управління…, 2024).

Середній вміст рухомих форм Фосфору в ґрунтах Житомирщини складає 119 мг/кг ґрунту – це підвищений рівень забезпеченості. Найбільші площі в області займають ґрунти з середнім (29,5%), підвищеним (28,0%) і високим (28,1%) умістом рухомих сполук Фосфору (Регіональна…, 2024).

Житомирщина – це єдина область країни, яка має дуже низький рівень забезпеченості ґрунтів рухомими формами Калію. Середній вміст даного показника становить 40,0 мг/кг ґрунту. Найбільші площі в області займають ґрунти з низьким (44,8%) та середнім (34,5%) умістом рухомих сполук Калію (Статистичний…, 2024).

Важливою проблемою для Житомирської області є підкислення ґрунтів. Середнє значення даного показника в області становить 5,5. Майже 238,7 тис. га (57%) орних земель області припадає на кислі ґрунти (pH<5,60) (Екологічний…, 2024). Найбільша кислотність ґрунтів характерна для районів, які знаходяться в поліській частині області, де переважають дерново-підзолисті ґрунти, а найменша – в лісостеповій частині. Основна причина підкислення ґрунтів – це незбалансоване, науково необґрунтоване внесення нітратних добрив. Підвищена кислотність ґрунтів перешкоджає нітратному та фосфорному живленню рослин навіть при достатньому їх вмісту в ґрунті.

На якість ґрунтів значно впливають такі деградаційні процеси як ерозія (вітрова та водна) та заболочування. Заболочені землі займають в області 101,2 тис. га, що становить 0,73% від площі області (Регіональна…, 2024). Основним ареалом поширення вітрових процесів (дефляції) в області є рівнинна територія на півночі, де переважають піщані та супіщані ґрунти, сформовані на глибоких пісках. Загальний відсоток дефляційно небезпечних ґрунтів – 40%. Розвиток ерозійних процесів стримується лише завдяки значній лісистості Поліської частини області. У південній лісостеповій частині поширені процеси водної ерозії – площинний змив. У Лісостепу площі сильно і середньо змитих земель становлять близько 13%. Найбільша площа ерозійно нестійких земель наявна в Бердичівському районі (на території Вчорайшенської та Ружинської територіальних громад – 32%, Любарської територіальної громади – 26%, Корнинської та Попільнянської територіальних громад, Квітневої та Андрушківської територіальних громад – 16%. Площа ріллі, яка розташована на схилах крутизною понад 5°, становить 21,3 тис. га, з них на схилах понад 7° – 6,7 тис. га (Управління…, 2024).

Ще одним видом деградації земель області є їх радіоактивне забруднення внаслідок аварії на ЧАЕС. Особливо підвищується радіаційний ризик на підтоплених і заболочених територіях та на площах з кислими ґрунтами. Сьогодні радіаційне забруднення Полісся відбувається за рахунок радіоактивних ізотопів, найпоширеніші з яких ^{137}Cs та ^{90}Sr. Під час обстеження сільськогосподарських угідь у 2016–2020 рр. була досліджена площа 419,1 тис. га. Забруднення в межах 5–15 Кі/км² (понаднормове) спостерігалося на площі 0,4 тис. га, що становить 0,1% від обстеженої площі (Кашпаров та ін., 2022). Якщо порівняти з даними 2001 року, коли щільність забруднення ґрунтів ^{137}Cs більше 5 Кі/км² (понад 185 кБк/м²) зафіксовано на площі 10,1 тис. га (0,9% обстежених земель), то можна визначити зменшення забруднення ґрунтів (Екологічний…, 2024). Станом на 2022 рік 9 населених пунктів (де є жителі) Житомирської області мають щільність забруднення території ^{137}Cs понад 185 кБк/м² (третя зона радіоактивного забруднення). Ці пункти розташовані в Коростенському районі (Регіональна…, 2024). Понаднормове забруднення території

^{90}Sr (0,15–3,0 Кі/км² або 5,55–111 кБк/м²) зафіксовано на площі 2,1 тис. га (0,5% обстеженої площі) (Кашпаров та ін., 2022). За даними 2001 року ця територія займала 39,5 тис. га (3,4%) (Регіональна…, 2024). Отже, сьогодні в межах області відбувається зменшення площ, забруднених радіоактивними ізотопами внаслідок їх розпаду.

Уповільнити деградаційні процеси можливо за рахунок впровадження комплексу заходів (організаційних, гідротехнічних, агротехнічних, агрохімічних та ін.), а також науково обґрунтованих підходів до землекористування. Але це потребує достатнього фінансування.

Біотичні ресурси зазнають значної трансформації внаслідок господарської діяльності людини. На території Житомирської області виділено 286 видів рослин, яким загрожує небезпека. У цьому переліку найбільше судинних рослин – 264 види. Позитивним є те, що з 2018 року кількість видів таких рослин залишається стабільною.

Серед рослинних ресурсів найбільше значення мають лісові ресурси. Для Житомирської області лісове господарство є надзвичайно важливою галуззю економіки. Площа земель, які мають лісогосподарське призначення, становить 1074,56 тис. га, з них (Екологічний…, 2024):

- державних підприємств – 774,3 тис. га;
- комунальних підприємств – 300,26 тис. га.

З 2000 по 2018 роки в області збільшувалися обсяги заготівлі ліквідної деревини, а з 2019 року спостерігається їх зменшення. У 2022 році було заготовлено ліквідної деревини на 300,2 тис. м³ менше ніж у 2021 році (рис. 6). Також в Житомирській області проводиться заготівля другорядних лісових матеріалів і лісових ресурсів побічного користування, проте фактична їх заготівля не перевищує встановлений ліміт (Пацева та ін., 2023). Значний антропогенний тиск на ліси здійснюється внаслідок безконтрольного збору рослин (лікарських рослин, весняних первоцвітів) та випасу худоби (Khomiak et al., 2024).

Площі загибелі лісових насаджень в Житомирській області за останні десятиліття значно збільшилися. Так, у 2010 році така площа дорівнювала 727 га, у 2015 році – 1839 га, у 2021 році – 2209 га, а у 2022 році – 6582 га (Статистичний…, 2024). Основними причинами загибелі лісових насаджень в Житомирській області є пожежі, хвороби та шкідники лісу, а також несприятливі погодні умови (Управління…, 2024).

Особливе занепокоєння викликає браконьєрство, кількість виявлених фактів якого в області висока: 2020 рік – 61 випадок, 2021 рік – 185, 2022 рік – 71 (Управління…, 2024).

Зниження випадків браконьєрства у 2022 році найймовірніше обумовлено забороною відвідування лісів області у зв'язку із воєнним станом (рис. 6).

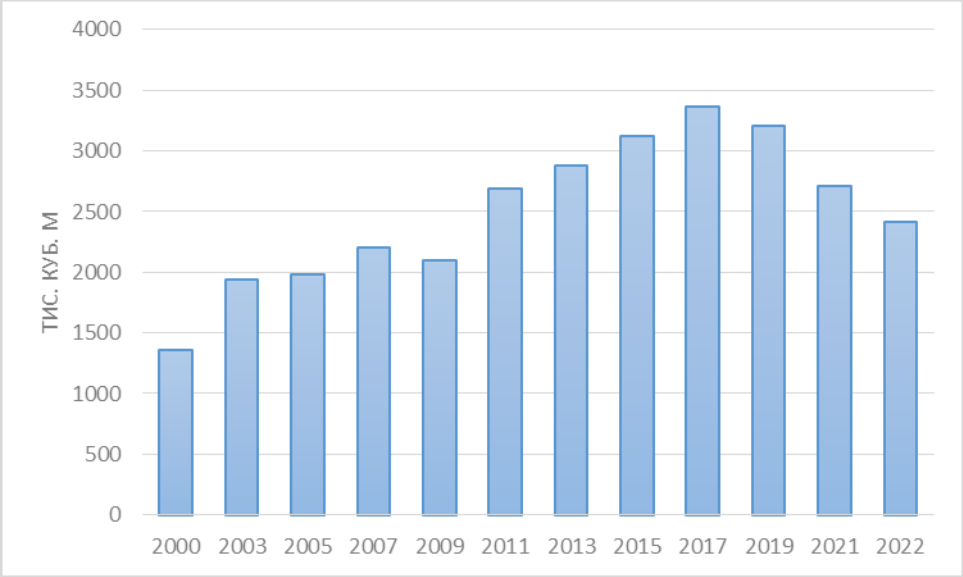


Рис. 6. Заготівля ліквідної деревини в Житомирській області за 2000–2022 роки

Джерело: побудовано авторами за (Пацева та ін., 2023; Статистичний…, 2024; Екологічний…, 2024; Регіональна…, 2024)

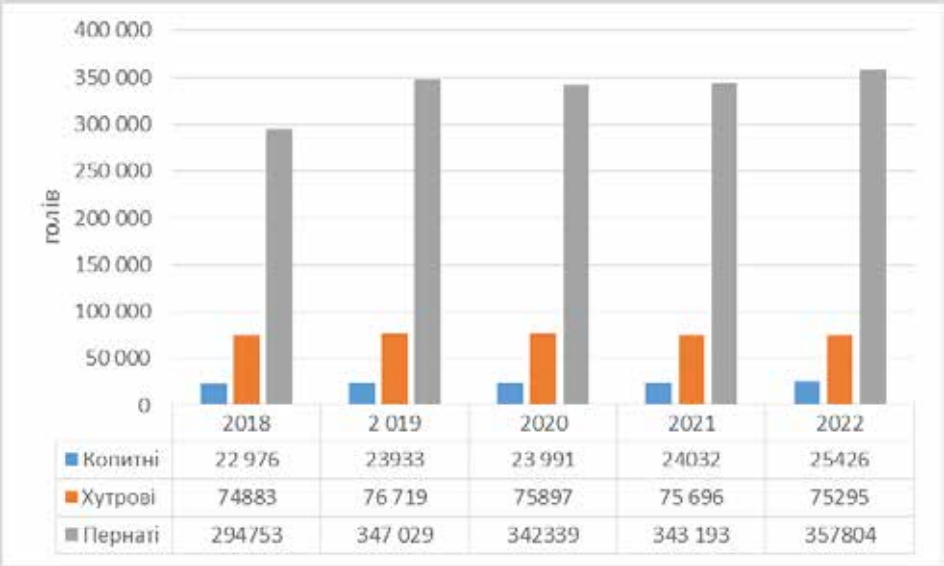


Рис. 7. Чисельність основних видів мисливських тварин Житомирської області за 2018–2022 рр.

Примітка: побудовано авторами за (Регіональна…, 2024).

Охорона та збільшення чисельності мисливських тварин можливі за умов проведення біотехнічних заходів, які поділяються на дві групи (Регіональна…, 2024):

• загальної конструктивної дії (А), що кардинально змінюють захисні та корисні властивості мисливських угідь на тривалий проміжок часу;

• обмеженої дії (Б), що впливають на тимчасову (сезонну) зміну ємкості мисливських угідь.

Серед наслідків повномасштабного вторгнення, яке розпочала рф 24.02.2022 р., варто зазначити довгостроковий негативний вплив бойових дій на навколишнє середовище. Територія Житомирської області на початку вторгнення зазнала активних бойових дій. Після деокупації північної частини нашої країни росія не припиняє масовані обстріли території, які призводять до пошкодження екосистем. За інформацією громадської організації «Екодія» на території Житомирської області станом на квітень 2024 року здійснено 17 злочинів проти довкілля.

Небезпека для навколишнього середовища в воєнних умовах пов'язана з ризиком забруднення внаслідок пошкодження інфраструктурних об'єктів і промислових підприємств або аварійного порушення їхньої роботи. В Житомирській області зафіксовані такі категорії злочинів:

• енергетична безпека – 8 випадків (переважно у м. Житомир);

• пошкодження промислових об'єктів – 8 випадків;

• ядерна небезпека – 1 випадок (21 березня 2022 року солдати рф захопили Чорнобильську зону відчуження, внаслідок їх дій поблизу с. Привар виникла пожежа).

Екологічна інспекція Поліського округу розрахувала розмір шкоди, завданої атмосфері речовинами, що виділяються при лісових та інших пожежах, при горінні складів мастильно-паливних матеріалів, земельним ресурсам. Це такі шкідливі домішки як Сульфур оксид, оксиди Нітрогену, оксиди Карбону, аміак, бенз(а)пірен, метали та їх сполуки. Підраховано, що через пожежі на нафтобазах області в повітря потрапило майже 13200 т забруднюючих речовин, а площа забруднених земель дорівнює понад 30 га. Також внаслідок ракетного обстрілу рф постраждали ліси, які належать державним підприємствам Житомирського обласного УЛМГ. Зафіксовано загоряння лісових та інших насаджень на площі понад 2000 га, внаслідок чого в атмосферу потрапило понад 1,5 млн тон шкідливих речовин. За даними екоінспекції сума збитків внаслідок вибухів на трьох нафтобазах Житомирської та Рівненської областей дорівнює майже 225 млн грн.

Значної шкоди було завдано і територіям ПЗФ. На території заповідника «Древлянський» (Народицька територіальна громада) знищено більше 2100 га лісів, як результат у повітря було викинуто десятки

тисяч тон шкідливих речовин різних класів небезпеки. Через військові дії можливе вивільнення радіоактивних ізотопів, акумульованих на території ПЗФ після Чорнобильської аварії. Внаслідок ракетних ударів по електропідстанціях восени 2022 року було загоряння мастил й ізолюючої електропроводки та виникли пожежі, що спричинило підвищення концентрації шкідливих речовин у атмосфері. Загальна сума шкоди, завданої навколишньому середовищу Житомирської області, дорівнює майже 15 млрд грн.

Висновки

У результаті проведеного аналізу сучасного стану навколишнього середовища регіону досліджень варто акцентувати увагу на таких аспектах:

• антропогенний вплив на територію Житомирської області характеризується як посередньо негативний. За минулі роки спостерігається зниження обсягів як загальних викидів шкідливих речовин, так і від пересувних та стаціонарних джерел. Найбільшим забруднювачем атмосфери в області є пересувні джерела. За видами економічної діяльності найбільші викиди в атмосферне повітря області здійснює переробна промисловість, сільське, лісове та рибне господарство та добувна промисловість і розроблення кар'єрів. Серед адміністративних районів області найбільші викиди зафіксовані в Житомирському районі, де розташоване ТОВ «ОБІО», яке є одним із найбільших забруднювачів атмосфери;

• основними водокористувачами є сільське господарство, житлово-комунальне господарство та промисловість. За минулі роки в області спостерігається суттєве зменшення обсягів водозабору. Основними забруднювачами водних об'єктів області є житлово-комунальні підприємства, які скидають 80,7% стічних вод. Склад забруднюючих речовин у зворотних водах наступний: сухий залишок (57%), хлориди (19%), ХСК (8%), сульфати (8%), нітрати (4%). У водах річок області зафіксовані перевищення ГДК по Феруму, ХСК, $БСК_5$. Радіаційний стан вод Житомирської області за вмістом ^{90}Sr і ^{137}Cs є стабільним і не перевищує норми;

• значна сільськогосподарська трансформація території області (сільськогосподарські угіддя займають 50,6% від земельного фонду) негативно впливає на якість ґрунтів і спричинює їх деградацію. Серед деградаційних процесів переважають ерозія (вітрова та водна) та заболочування. Із 1981–1985 років починається значне зниження вмісту гумусу в ґрунтах області. Середнє його значення зараз дорівнює 2,07%. Середній вміст легкогідролізованого азоту в ґрунтах Житомирщини складає 89 мг/кг ґрунту (дуже низький рівень забезпеченості). Житомирщина – це єдина область країни, яка має дуже низький рівень забезпеченості ґрунтів рухомими формами Калію (середнє значення 40,0 мг/кг ґрунту). Значні площі в області займають сільгоспугіддя із кислими ґрунтами – 57% від площі території. За минулі десятиліття радіаційне забруднення ґрунтів області значно зменшилося: понаднормове забруднення ^{137}Cs становить 0,1%, а ^{90}Sr – 0,5% від обстеженої площі. Значної трансформації внаслідок господарської діяльності людини зазнають біотичні ресурси. На території Житомирської області виділено 286 видів рослин і 134 види тварин, яким загрожує небезпека;

• негативно вплинули на навколишнє середовище області військові дії (2022–2024 рр.): зафіксовано 17 злочинів проти довкілля, загальна сума шкоди дорівнює майже 15 млрд грн.

Список використаної літератури

Валерко Р.А., Герасимчук Л.О. Оцінка рівня техногенного навантаження Житомирської області. *Вісник Житомирського національного агроекологічного університету.* 2017. Т. 1. № 1 (58). С. 39–48.

Екологічний паспорт Житомирської області за 2023 рік [Електронний ресурс]. URL: https://eprdep.zht.gov.ua/Regionalna%20dopovidj%202023.pdf (дата звернення 12.08.2024).

Кашпаров В.О., Голяка Д.М., Левчук С.Є., Берковський В.Б. Зонування територій радіоактивного забруднення після Чорнобильської аварії. *Ядерна фізика та енергетика.* 2022. Т. 23. № 3. С. 182–194. https://doi.org/10.15407/jnpae2022.03.182.

Нестерчук І.К. Ландшафтно-типологічна структура території Житомирської області. *Фізична географія та геоморфологія.* 2016. № 1 (81). С. 41–52.

Пацева І.Г., Барабаш О.В., Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В.І., Пацев І. С. Аналіз сучасного стану лісових ресурсів у контексті сталого розвитку. *Технології захисту навколишнього середовища.* 2023. № 4 (493). С. 205–211. https://doi.org/10.15589/znp2023.4(493).27.

Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища Житомирської області у 2022 році [Електронний ресурс]. URL: https://eprdep.zht.gov.ua/Regionalna%20dopovidj%20 2023.pdf (дата звернення 13.08.2024).

Смілий П.М., Гопчак І.В., Басюк Т.О. Екологічна оцінка якості поверхневих вод Житомирського Полісся. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія.* 2021. № 2 (60). С. 41–48. https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.2.5.

Статистичний щорічник України за 2021 рік. Державна служба статистики України [Електронний ресурс]. URL: https://www.zt.ukrstat.gov.ua/ (дата звернення 22.04.2024).

Стратегія розвитку Житомирської області на період до 2027 року [Електронний ресурс]. URL: http://dfrr.minregion.gov.ua/foto/projt_reg_info_norm/2020/01/Strategiya-do-2027-roku.pdf (дата звернення 12.08.2024).

Управління екології та природних ресурсів Житомирської облдержадміністрації. Офіційний сайт [Електронний ресурс]. URL: https://eprdep.zht.gov.ua (дата звернення 13.08.2024).

Khomiak I., Harbar O., Kostiuk V., Demchuk N., Vasylenko O. Synphytoindication models of the anthropogenic transformation of ecosystems. *Natura Croatica.* 2024. Vol. 33. №. 1. P. 65–77. https://doi.org/10.20302/NC.2024.1.5.

Lavryk O., Volovyk V., Maksiytov A., Tsymbaliuk V. Optimization variations of valley-river landscape-technical systems of the Right Bank zone of Ukraine. *Journal of geology, geography and geoecology.* 2022. Vol. 31(3). P. 504–512. https://doi.org/10.15421/112246.

Lavryk O.D., Tsymbaliuk V.V., Poshtaruk L.I. Recognition of a landscape techno-sphere as a new geosphere. *Український журнал природничих наук.* 2022. № 2. С. 85–94. https://doi.org/10.35433/naturaljournal.2.2023.85-94.

References

Valerko, R.A., & Herasymchuk, L.O. (2017). Otsinka rivnia tekhnohennoho navantazhennia Zhytomyrskoi oblasti [Assessment of the level of man-made load in the Zhytomyr region]. *Visnyk Zhytomyrskoho natsionalnoho ahroekolohichnoho universytetu [Bulletin of the Zhytomyr National Agroecological University],* 1 (58), 1, 39–48 [in Ukrainian].

Ekolohichnyy pasport Zhytomyrskoi oblasti za 2023 rik [Environmental passport of the Zhytomyr region for 2023]. [Electronic resource] URL: https://eprdep.zht.gov.ua/Regionalna%20dopovidj%20 2023.pdf (access date 12.08.2024) [in Ukrainian].

Kashparov, V.O., Holiaka, D.M., Levchuk, S.Ye., & Berkovskyi, V.B. (2022). Zonuvannia terytorii radioaktyvnoho zabrudnennia pislia Chornobylskoi avarii [Zoning of the territories of radioactive contamination after the Chernobyl accident]. *Yaderna fizyka ta enerhetyka [Nuclear physics and energy],* 23 (3), 182–194 https://doi.org/10.15407/jnpae2022.03.182 [in Ukrainian].

Nesterchuk, I.K. (2016). Landshaftno-typolohichna struktura terytorii Zhytomyrskoi oblasti [Landscape-typological structure of the territory of Zhytomyr region]. *Fizychna heohrafiia ta heomorfolohiia [Physical geography and geomorphology],* 1 (81), 41–52 [in Ukrainian].

Patseva, I., Barabash, O., Melnyk-Shamrai, V., Shamrai, V., & Patsev, I. (2023). Analiz suchasnoho stanu lisovykh resursiv u konteksti staloho rozvytku [Analysis of the current state of forest resources in the context of sustainable development]. *Tekhnolohiyi zakhystu navkolyshn'oho seredovyshcha [Environmental protection technologies],* 4 (493), 205–211 https://doi.org/10.15589/znp2023.4(493).27 [in Ukrainian].

Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha Zhytomyrskoi oblasti u 2022 rotsi [Regional report on the state of the natural environment of the Zhytomyr region in 2022]. [Electronic resource] URL: https://eprdep.zht.gov.ua/Regionalna%20dopovidj%202023.pdf (access date 08.13.2024) [in Ukrainian].

Smiliy, P.M., Hopchak, I.V., & Basyuk, T.O. (2021). Ekolohichna otsinka yakosti poverkhnevykh vod Zhytomyrskoho Polissya [Ecological assessment of surface water quality of Zhytomyr Polissia]. *Hidrolohiya, hidrokhimiya i hidroekolohiya [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology],* 2 (60), 41–48. https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.2.5 [in Ukrainian].

Statystychnyi shchorichnyk Ukrainy za 2021 rik. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy [Statistical Yearbook of Ukraine for 2021. State Statistics Service of Ukraine]. [Electronic resource] URL: https://www.zt.ukrstat.gov.ua/ (access date 22.04.2024) [in Ukrainian].

Stratehiia rozvytku Zhytomyrskoi oblasti na period do 2027 roku [Development strategy of the Zhytomyr region for the period until 2027]. [Electronic resource] URL: http://dfrr.minregion.gov.ua/foto/projt_reg_info_norm/2020/01/Strategiya-do-2027-roku.pdf/ (access date 12.08.2024) [in Ukrainian].

Upravlinnia ekolohii ta pryrodnykh resursiv Zhytomyrskoi oblderzhadministratsii Ofitsiinyi sait [Department of Ecology and Natural Resources of the Zhytomyr Regional State Administration is the official website]. [Electronic resource] URL: https://eprdep.zht.gov.ua/ (access date 13.08.2024) [in Ukrainian].

Khomiakm, I., Harbar, O., Kostiuk, V., Demchuk, N., & Vasylenko, O. (2024). Synphytoindication models of the anthropogenic transformation of ecosystems. *Natura Croatica*, 33 (1), 65–77 https://doi.org/10.20302/NC.2024.1.5 [in English].

Lavryk, O., Volovyk, V., Maksiytov, A., & Tsymbaliuk, V. (2022). Optimization variations of valley-river landscape-technical systems of the Right Bank zone of Ukraine. Journal of Geology, *Geography and Geoecology*, 31 (3), 504–512. https://doi.org/10.15421/112246 [in English].

Lavryk, O.D., Tsymbaliuk, V.V., & Poshtaruk, L.I. (2022). Recognition of a landscape techno-sphere as a new geosphere. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*, 2, 85–94. https://doi.org/10.35433/naturaljournal.2.2023.85-94 [in English].

Отримано: 04.11.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

ХІМІЯ

UDC 544.18:615.277.4:601.2:577.121
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.4

APPLICATION OF QUANTUM-CHEMICAL METHODS TO ESTIMATE THE CARCINOGENIC PROPERTIES OF BENZOPYRENE METABOLITES

I. V. Korotkova[1], T. P. Romashko[2]

Benzo[a]pyrene is a common environmental pollutant and a powerful carcinogen that can accumulate in various organs and tissues, causing DNA damage through the adducts' formation, which contributes to the development of neoplasms of various localization. This compound carcinogenic activity is well studied and proven to be related to the nature and electronic configuration of biologically activated metabolites. Since not all metabolites of benzo[a]pyrene show carcinogenic effects, in this study an attempt to theoretically investigate their spectral properties and to use the obtained data in establishing a correlation with the observed carcinogenic effect was made. In order to study the spectroscopic properties of benzo[a]pyrene metabolites which, depending on the transformation pathways, can form products with different carcinogenic activity, the energies of the lower electronically excited states of metabolite molecules were calculated using the semi-empirical PM3 method (Hyper Chem 7.5). To determine the features of the electron density distribution during the molecules' excitation, we used the values of the occupancy of the highest occupied molecular orbital and the lowest unoccupied molecular orbital, which participate in one-electron transitions.
The calculation results of the position of the benzo[a]pyrene absorption spectra satisfactorily correlate with the experimental data presented in the literature, which is a confirmation of the obtained data reliability regarding the spectral characteristics of its metabolites. The performed calculations made it possible to determine the position of the long-wavelength absorption bands of some metabolites, for which experimental data have not been currently determined. It has been established that the long-wave bands in the absorption spectra of carcinogenic metabolites of benzo[a]pyrene in the number: BP → BP 7,8-epoxide → BP 7,8-dihydrodiol → BP 7,8-dihydrodiol-9,10-epoxide are equally intense and sequentially shifted to the short-wavelength region relative to the benzo[a]pyrene absorption spectra.

Key words: *quantum-chemical calculations, metabolites, carcinogenic activity, molecular orbital population.*

[1] PhD in Chemistry, Associate Professor,
Professor at the Biotechnology and Chemistry Department
(Poltava State Agrarian University, Poltava)
e-mail: 2irinakorotkova10@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0577-9634
[2] PhD in Chemistry, Associate Professor,
Head of Biotechnology and Chemistry Department
(Poltava State Agrarian University, Poltava)
e-mail: tamila_romashko@ukr.net
ORCID: 0000-0002-9777-4189

ВИКОРИСТАННЯ КВАНТОВО-ХІМІЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ОЦІНКИ КАНЦЕРОГЕННИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАБОЛІТІВ БЕНЗОПІРЕНУ

І. В. Короткова, Т. П. Ромашко

Бензо[а]пірен є поширеним забруднювачем навколишнього середовища та потужним канцерогеном, який може накопичуватися в різних органах і тканинах, зумовлюючі пошкодження ДНК шляхом утворення аддуктів, що сприяє розвитку новоутворень різної локалізації. Канцерогенна активність цієї сполуки добре вивчена і доведено, що вона пов'язана з природою та електронної конфігурацією біологічно активних метаболітів. Оскільки не всі метаболіти бензо[а]пірену виявляють канцерогенну дію, в даній роботі зроблено спробу теоретично дослідити їх спектральні властивості та використати отримані дані у встановленні кореляції з спостережуваною канцерогенною дією. З метою дослідження спектроскопічних властивостей бензо[а]пірену, який залежно від шляхів метаболізму може утворювати продукти з різною канцерогенною активністю, виконано розрахунок енергій нижчих електронно-збуджених станів молекул метаболітів за допомогою напівемпіричного методу PM3 (Hyper Chem 7.5). Для встановлення особливостей розподілу електронної густини при збудженні молекул використовували значення заселеності найвищої зайнятої молекулярної орбіталі і найнижчої вакантної молекулярної орбіталі, які беруть участь в одноелектронних переходах. Результати розрахунку положення спектру поглинання бензо[а]пірену задовільно корелюють з наведеними в літературі експериментальними даними, що є підтвердженням достовірності отриманих даних щодо спектральних характеристик його метаболітів. Виконані розрахунки дозволили визначити положення довгохвильових смуг поглинання деяких метаболітів, для яких на теперішній час експериментальні дані не встановлені. Показано, що довгохвильові смуги в спектрах поглинання канцерогенних метаболітів бензо[а]пірену в ряді: BP →BP 7,8-epoxide → BP 7,8-dihydrodiol → BP 7,8-dihydrodiol-9,10-epoxide рівноінтенсивні і послідовно зміщені в короткохвильову область відносно спектру поглинання бензо[а]пірену.

Ключові слова: *квантово-хімічні розрахунки, метаболіти, канцерогенна активність, заселеність молекулярних орбіталей.*

Introduction

Benzopyrene is a representative polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) formed as a by-product in various thermal processes and founded in almost all environmental objects. The main anthropogenic source of benzo[a] pyrene (BP), such as other PAH, is industry. Natural sources include mainly forest fires, reactions of humus compounds under the influence of soil microorganisms leading to the coal or oil formation, as well as biosynthesis carried out by bacteria, algae and plants. But these processes generate a relatively small percentage of PAHs compared to the amount of anthropogenic origin PAHs (Styszko et al., 2023). Most of PAHs with a high molecular weight are a potential long-term danger to human and animal health due to their high mobility, the ability to disperse in the biosphere, and slowly destruction. In particular, BP is recognized as one of the genotoxic carcinogens, which contributes to the tumors' initiation in almost all living organisms (Yemele et al., 2024). In addition, BP causes the immunotoxic, teratogenic effects and induces the cell apoptosis and proliferation, as well as enhanced DNA methylation.

When PAHs entering the human, the different transformations under the enzyme systems effect take place. Among all carcinogenic substances, the BP metabolism is most studied and presented in a number of modern reviews (Jiang et al., 2007; Garcia et al., 2023; Kim et al., 2024). It has been established the biological action of BP begins with the metabolic activation, and the first stage – oxidation by cytochrome P-450 dependent oxygenases takes place in the endoplasmic reticulum (Bukowska et al., 2022). However, the carcinogenic derivatives are produce not on the all routes of BP metabolism. At the first stage, many different BP metabolites are generated, such as epoxides and phenols. Phenols, which can be enzymatically transformed into quinones, are mainly weak carcinogens, except the highly carcinogenic 2-hydroxy-BP. Other phenols, for example, 6-hydroxy-BP, demonstrate only strong toxic properties. Epoxides via the epoxide hydrolase action are converted into the corresponding dihydrodiols, which further oxidized to BP-7,8-diol-9,10-epoxide. This compound is the final reactive form which generate the bulky DNA adducts – carcinogenesis initiators.

Adduct formation is the result of covalent binding between reactive BP metabolites (electrophilic substances) and nucleophilic sites in DNA and proteins, and evidence of these substances carcinogenic potential. Covalent DNA adducts formation in the presence of BP has long been used as a biomarker. The main adduct responsible for carcinogenesis is formed as a result of BP 7,8-dihydrodiol-9,10-epoxide transformations, the most mutagenic of the four possible enantiomers, and the N_2 position of guanine in the DNA structure was determined to be the best position for adduction (Madeen et al., 2019).

Ewa B. & Danuta M.Š. (2017) reported the biological activity of these compounds is related to their structural features, which affect the electron density distribution and, indirectly, the certain positions reactivity of the condensed system. Now, a number of biomonitoring methods have been developed to assess the BP and its metabolites effect on the human organism (Louro et al., 2022).

Take into account the ability of BP adducts with DNA and BP metabolites to fluorescence, the spectral-luminescence methods are widely used for their determination (Fan et al., 2018), and the synchronous scanning fluorescence method have a great importance among it (Zhang et al., 2015). Method provides the recording fluorescence spectra by simultaneously scanning excitation and emission wavelengths at the same speed (synchronously) and, maintaining a constant difference between the emission and the excitation wavelength (Silveira & Barbeira, 2022). This method allows the determination of relatively low adducts concentrations and separate their fluorescence spectra.

Despite remarkable progress in modern analytical methods, none of them can be recommended as the most informative and perfect to determination of DNA adducts or BP metabolites. Although experimental studies have a clear priority, the role of theoretical research is quite important for to obtain data which extremely difficult to determine experimentally.

In many cases, the studied systems parameters are easier to calculate using quantum chemistry methods, than to determine them based on a large set of experimental data. In this work, a quantum-chemical study of the BP metabolites spectral characteristics was carried out for the predicting their carcinogenic nature and to determine the absorption bands position of those metabolites for which there are no experimental data.

Material and Methods

To theoretically evaluate the carcinogenic properties of benzpyrene metabolites, a number of model compounds were created: 3,4-benzpyrene (BP), 4,5-benzpyrene (4,5-BP) and products of 3,4-benzpyrene metabolism:

1) 6-hydroxy-BP (6-OH-BP), 4,5-dihydrodiol-BP (4,5-BPD), 9,10-dihydrodiol- BP (9,10-BPD) are weak carcinogens;

2) 2-hydroxy-BP (2-OH-BP), BP 7,8-epoxide, BP (+)7,8-dihydrodiol, BP (–)7,8-dihydrodiol, BP (–)7,8-dihydrodiol-9,10-epoxide-1 (BPDE-1), BP (+)7,8-dihydrodiol-9,10-epoxide-2 (BPDE-2) are highly carcinogenic compounds.

Quantum-chemical calculations of energy parameters (energy of lowest electronic-excited states (singlet and triplet, $S\pi\pi^*$ and $T\pi\pi^*$), oscillator strengths (f), configurational interaction coefficients (Ck)) of the studied compounds were performed in the frames of semi-empirical PM3 procedure using the HyperChem 7.5 program package (Young, 2001). Geometry of molecules have been optimized, taking into account the interaction of 15 once-excited electronic configurations of the $\pi\pi^*$-type 15 HOMO x 15 LUMO (where HOMO is the highest occupied molecular orbital, LUMO – lowest unoccupied molecular orbital).

In many computational studies, the semi-empirical PM3 method is most commonly used to calculate of organic systems, despite many limitations and inaccuracies. PM3 method on average predicts the energies and lengths bond' more accurately than AM1 or MNDO methods, what determines the main advantage of this method (Thiel, 2014; Christensen et al., 2016). We have previously shown the bond length with heteroatom in the chromophore fragment has a significant influence on the relative position of the energy levels of the lowest electronic-excited states and, as a consequence, on the molecules' spectral-luminescent properties (Sakhno & Korotkova, 1999; Sakhno et al., 2002). This determined the choice of calculation method the energy parameters of the studied systems.

Results and Discussion

Figure 1 fragmentary shows the diol epoxides formation from BP (Hecht & Hochalter, 2014), which are causes of the BP carcinogenic effect. The ability of BP dihydrodiols to initiate tumor formation has been established experimentally. It has been founded the carcinogenic effect

as BP (–)7,8-dihydrodiol as BP is almost the same. Other dihydrodiols – 4,5- and 9,10-dihydrodiols has much less activity than BP 7,8-dihydrodiols. When testing the enantiomers of BP 7,8-dihydrodiol, the (–) enantiomer was found to be more active relative with the (+) enantiomer (Rubin, 2021.

The strongest carcinogenic activity among all BP metabolites was found in its final metabolite 7,8-dihydrodiol-9,10-epoxide (7,8-BPDE), which can exist in the four enantiomer forms. It has been established that (+)7,8-dihydrodiol-9,10-epoxide-2 is more ~ 60% active tumor initiator compared to other enantiomers, i.e. BPDE-2 is the main BP carcinogenic metabolites (Fischer et al., 2018).

Table 1 presents the calculation results of electron-excited states of BP and its metabolites: phenols and diols by the PM3 method. As follows from the presented data, the lowest singlet states of the ππ*-type in the molecules of carcinogenic compounds are formed as a result of a one-electron transition from the highest occupied molecular orbital (HOMO) to the lowest unoccupied molecular orbital (LUMO) with a sizeable oscillator strength. The main role in the S2 state belongs by two electronic configurations.

Thus, in the phenol molecule 2-OH-BP, which has carcinogenic properties, the long-wave transition from HOMO to LUMO (49→50) is presented by an intense band (f=0.27) of 22753 cm^{-1} region. It should be noted the location proximity of this band to the BP absorption band (22814 cm-1). The formation of the second singlet state occurs due to two-electron transitions from 49→51 and 48→50 molecular orbitals (MO) with a small oscillator strength (f=0.07).

Carcinogenic phenol 2-OH-BP formation during the BP metabolism has almost no effect on the lowest singlet level position, but with the 6-OH-BP formation, which characterized only by toxic properties, the lowest singlet level energy decreases by ≈ 800 cm^{-1}. The value of energy singlet-triplet split (ES-T) of the ππ* levels in these compounds molecules is almost the same (12500 cm^{-1}). The energy of the lowest electronic-excited states in the dihydrodiols (4,5-BPD and 9,10-BPD) molecules with a moderate carcinogenic effect, also decreases relative to the carcinogenic BP: the energy of singlet levels – by 472 and 620 cm^{-1}, and triplet levels – by 906 and 336 cm^{-1}, respectively. The value of the Sππ* and Tππ* energy gap in these metabolites molecules also does not change (≈ 12500 cm^{-1}).

However, the highly carcinogenic BP 7,8-dihydrodiol formation leads to an increase in the energy of the lower singlet level on 410 cm^{-1}. The long-wavelength transitions in dihydrodiols molecules of 4,5-BPD and 9,10-BPD are represented by an intense bands (f=0.43) at 22342 and 22194 cm^{-1}, respectively, due to a one-electron transitions with 52→53 MO. This transition in the molecule of carcinogenic BP 7,8-dihydrodiol is presented by a band of the same intensity

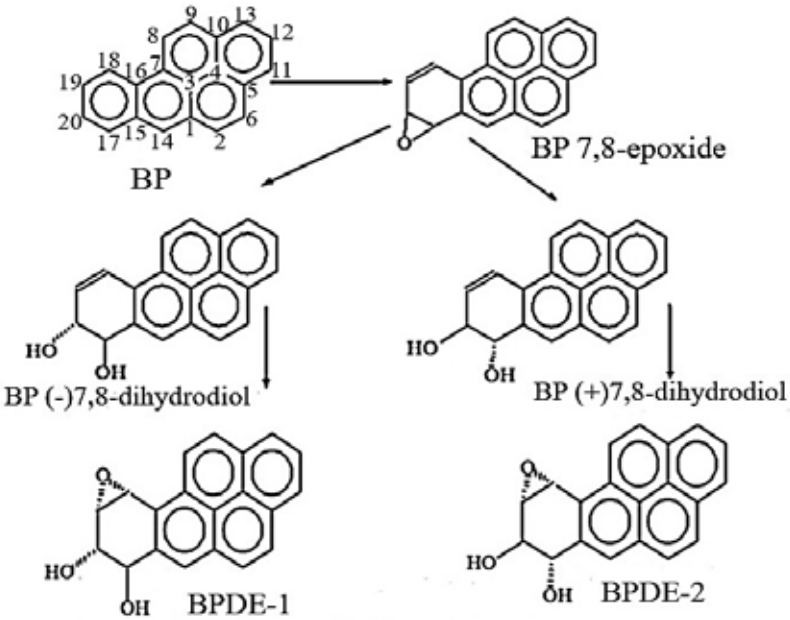


Fig. 1. Formation of benzopyrene carcinogenic metabolites

Table 1

PM3 analysis of the lowest energy transitions of BP molecule and its metabolites

Molecule	**State**	**E, cm^{-1}**	$\psi_N \rightarrow \psi^*_N$	**$C_к$**	**f**
BP	$S_1(\pi\pi^*)$	22814	46→47	0,61	0,40
	$S_2(\pi\pi^*)$	23212	46→48	-0,48	0,0025
			45→47	0,44	
	$T_1(\pi\pi^*)$	10291	46→47	0,61	
	$T_2(\pi\pi^*)$	17732	46→49	0,37	
			44→47	-0,33	
4,5-BP	$S_1(\pi\pi^*)$	24786	46→48	-0,46	0,0005
			45→47	-0,43	
	$S_2(\pi\pi^*)$	25174	46→47	0,52	0,11
			45→48	-0,38	
	$T_1(\pi\pi^*)$	13800	46→47	0,54	
	$T_2(\pi\pi^*)$	19754	46→50	-0,34	
			43→47	-0,31	
2-OH-BP	$S_1(\pi\pi^*)$	22753	49→50	0,54	0,27
	$S_2(\pi\pi^*)$	22897	49→51	-0,41	0,07
			48→50	0,42	
	$T_1(\pi\pi^*)$	10457	49→50	0,61	
	$T_2(\pi\pi^*)$				
6-OH-BP	$S_1(\pi\pi^*)$	22018	49→50	0,62	0,46
	$S_2(\pi\pi^*)$	22631	49→51	0,52	0,039
			48→50	-0,38	
	$T_1(\pi\pi^*)$	9461	49→50	0,62	
	$T_2(\pi\pi^*)$	17376	49→52	0,36	
			47→50	0,32	
4,5-BPD	$S_1(\pi\pi^*)$	22342	52→53	0,62	0,43
	$S_2(\pi\pi^*)$	23027	52→54	0,49	0,018
			51→53	-0,41	
	$T_1(\pi\pi^*)$	9385	52→53	-0,59	
	$T_2(\pi\pi^*)$	16095	50→53	0,34	
9,10-BPD	$S_1(\pi\pi^*)$	22194	52→53	-0,60	0,43
	$S_2(\pi\pi^*)$	22668	52→54	-0,49	0,016
				0,37	
	$T_1(\pi\pi^*)$	9955	52→53	-0,61	
	$T_2(\pi\pi^*)$	15719	52→53	-0,39	

(f=0.48), shifted to the short-wavelength region by ≈ 950 cm^{-1}.

Known, benzopyrene molecule has five benzene rings, and can exist in two isomeric forms exhibits different biological activity. Depending on the place of the fifth benzene ring attachment, isomers benzo[a]pyrene or 3,4-benzpyrene, which has characteristic carcinogenic properties, and benzo[e]pyrene or 4,5-benzpyrene with a weak carcinogen activity are distinguished (Mokrzyński et al., 2023).

The calculation results showed the absorption spectra of 4,5-BP is shifted to the long-wave region relative to the BP spectra by 2360 cm^{-1} and represented by a moderate intensity band (f=0.11), formed as a result of the electron transition from 46→47 MO, as in the BP spectra, but this band intensity in the BP spectra is significantly greater (f=0.40). The calculated position of the BP absorption spectra correlates with the experimental data presented by Han et al., (2023) with a correction for the solvent influence, since theoretical calculations describe the molecule in a vacuum.

To establish the features of the electron density distribution at the molecule's excitation, the population values of highest occupied molecular orbital (HOMO) and lowest unoccupied molecular orbital (LUMO) participating in once-electron transitions were used. This criterion we used in a number of previously studies to explain the spectral properties changes of heteroatomic molecules caused by the external factors effect (Korotkova et al., 1997; Sakhno & Korotkova, 1999). Molecular orbitals included in the main ππ*-type configurations are presented in Table 2. Since ππ*-type orbital has one component

(i=z), the Table 2 shows only d_β values of p_z-component of MO.

The excitation degree of the base molecule orbitals upon the introduction of one or two –OH groups was determined by the squares of the coefficient of MO expansion in the atomic orbitals (AO) studied compounds values. It was established that the introduction of the –OH group in the C2 position of the benzopyrene molecule does not significantly affect d_β^2 value. That is, if in BP molecule d_β^2 =0,038, then in 2-OH-BP d_β^2 = 0,021, which agreement with insufficient changes in the long-wave transitions location in these compounds' absorption spectra. However, when introduce an –OH group into C6 position (6-OH-BP), d_β^2 value increases almost threefold, which can serve as an explanation for the change of the lowest singlet level position compared to the BP molecule.

A comparison of the d_β^2 coefficients on the carbon atoms connected with –OH groups is confirms the established correlation: d_β^2 on the C2 atom in the molecule of carcinogenic phenol 2-OH-BP decreases by 1.1-fold compared to the BP molecule, and on the C6 atom in 6-OH-BP molecule with weak carcinogenicity increases by 1.2-fold.

Dihydrodiols generation, which have weakly expressed carcinogenic properties, that is, the introduction of two –OH groups, leads to a shift in the absorption spectra to the long-wave region relative to the BP spectra (Table 1). The obtained correlations cannot be explained by once-directional changes in the d_β^2 coefficients on carbon atoms bonded to –OH groups. Comparison d_β^2 values in the 4,5-BPD molecule showed an increase by almost 5-fold on C4 in the absence of significant changes on the C5 atom relative to BP molecule. In 9,10-BPD dihydrodiol molecule, d_β^2 value on C9 atom practically did not change, while on C10 it decreased by 1.8-fold.

Most active carcinogenic metabolites of BP, presented in the Scheme, occur from diol-epoxides. The energies of these compound's lowest electronic-excited states, derived from our PM3 computations, shown in Table 3.

Table 2

Computed structure of the main molecular orbitals involved in the lowest electronic-excited states of BP metabolites

№ atom	**BP**		**2-OH-BP**		**6-OH-BP**		**4,5-BPD**		**9,10-BPD**	
	ψ_{46}	ψ_{47}	ψ_{49}	ψ_{50}	ψ_{49}	ψ_{50}	ψ_{52}	ψ_{53}	ψ_{52}	ψ_{53}
1.	0,220	0,216	0,219	0,216	-0,260	-0,206	-0,195	0,212	0,213	-0,225
2.	-0,269	0,266	-0,260	0,274	0,252	-0,249	0,336	0,259	-0,246	-0,265
3.	-0,129	0,129	-0,135	0,128	0,115	-0,123	0,082	0,133	-0,140	-0,120
4.	0,019	0,019	0,033	0,009	-0,021	-0,014	-0,043	0,018	0,012	-0,023
5.	0,224	-0,223	0,209	-0,237	-0,202	0,209	-0,192	-0,224	0,207	0,216
6.	-0,260	-0,260	-0,263	-0,259	0,285	0,239	0,333	-0,252	-0,239	0,268
7.	-0,270	-0,270	-0,289	0,257	0,301	0,255	0,241	-0,270	-0,263	0,280
8.	0,195	-0,195	0,179	-0,206	-0,178	0,187	-0,170	-0,193	0,175	0,184
9.	0,289	0,291	0,301	0,282	-0,297	-0,274	-0,249	0,288	0,283	-0,282
10.	-0,091	0,089	-0,065	0,106	0,085	-0,085	0,095	0,086	-0,068	-0,091
11.	0,292	0,294	0,277	0,298	-0,297	-0,271	-0,291	0,292	0,267	-0,292
12.	-0,068	0,069	-0,069	0,080	0,059	-0,065	0,048	0,074	-0,071	-0,064
13.	-0,315	-0,317	-0,330	-0,305	0,315	0,293	0,299	-0,316	-0,290	0,313
14.	0,412	0,413	0,409	-0,416	-0,383	0,427	0,391	-0,411	0,393	0,409
15.	0,029	-0,030	-0,024	-0,034	-0,049	0,083	0,024	-0,031	-0,055	0,037
16.	-0,184	0,188	-0,174	0,194	0,164	-0,195	0,182	0,187	-0,143	-0,189
17.	-0,232	0,233	-0,237	0,230	-0,192	-0,264	0,209	0,233	-0,269	0,238
18.	0,179	0,177	0,191	0,169	-0,155	-0,204	-0,154	0,177	0,235	-0,185
19.	0,233	-0,226	0,222	-0,226	-0,180	0,254	0,205	-0,226	0,289	0,215
20.	-0,078	-0,076	-0,088	-0,069	0,092	0,079	0,066	-0,075	-0,049	0,085
			0,038	-0,029	0,214	-0,151	-0,167	-0,090	-0,130	0,066
							-0,167	0,088	-0,150	-0,070

Note: β – is the atomic index; $d_\beta(p_z)$ – is the coefficient of MO expansion in the atomic orbitals (AO)

Table 3

Energies of the lowest electronic-excited states, oscillator strengths of transitions in molecules of carcinogenic BP metabolites obtained by PM3 method

Molecule	$S_{\pi\pi^*}$	**f**	$T_{\pi\pi^*}$
BP	22814	0,41	10291
BP 7,8-epoxide	23000	0,002	10909
BP (–)7,8-dihydrodiol	23224	0,48	11184
BP (+)7,8-dihydrodiol	23229 23696	0,49 0,001	11157 17323
BPDE-2	24258	0,003	12234
BPDE-1	24273	0,008	12302

On the basis of our computation results, we can conclude that the long-wave bands in the absorption spectra of carcinogenic metabolites of BP are consistently shifted to the short-wave region, which is explained by a decreasing the longer a conjugated chain and the introduction of a heteroatom.

Conclusions

The PM3 calculations reported in this work have been performed using the Hyper Chem 7.5 program. We have performed calculations of the relative positions of the lowest electronic-excited states of 3,4-benzopyrene, its metabolites and its isomeric form for predicting carcinogenicity. It was established the decrease in the energy of the lower singlet level in molecules of non-carcinogenic compounds correlates with an increase in d_β^2 the coefficient on p_z-AO. In the absorption spectra of carcinogenic BP metabolites, the long-wavelength bands are of equal intensity and consistently shifted to the short-wavelength region relative to the BP spectra.

Bibliography

Bukowska B., Mokra K., Michałowicz J. Benzo[*a*]pyrene-Environmental Occurrence, Human Exposure, and Mechanisms of Toxicity. *International Journal of Molecular Sciences.* 2022. Vol. 23. № 11. P. 6348. https://doi.org/10.3390/ijms23116348.

Christensen A.S., Kubař T., Cui Q., Elstner M. Semiempirical Quantum Mechanical Methods for Noncovalent Interactions for Chemical and Biochemical Applications. *Chemical Reviews.* 2016. Vol. 116. № 9. P. 5301–5337. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00584.

Ewa B., Danuta M.Š. Polycyclic aromatic hydrocarbons and PAH-related DNA adducts. *Journal of Applied Genetics.* 2017. Vol. 58. № 3. P. 321–330. https://doi.org/10.1007/s13353-016-0380-3.

Fan Z., et al. Rapid fluorescence immunoassay of benzo[*a*]pyrene in mainstream cigarette smoke based on a dual-functional antibody-DNA conjugate. *RSC Advances.* 2018. Vol. 8. № 52. P. 29562–29569. https://doi.org/10.1039/c8ra04915g.

Fischer J.M.F., et al. PARP1 protects from benzo[a]pyrene diol epoxide-induced replication stress and mutagenicity. *Archives of Toxicology.* 2018. Vol. 92. № 3. P. 1323–1340. https://doi.org/10.1007/s00204-017-2115-6.

Garcia A.L.C, et al. Metabolic Activation of Benzo[*a*]pyrene by Human Tissue Organoid Cultures. *International Journal of Molecular Sciences.* 2023. Vol. 24. № 1. P. 606. https://doi.org/10.3390/ijms24010606.

Hecht S.S., Hochalter J.B. Quantitation of enantiomers of r-7,t-8,9,c-10-tetrahydroxy-7,8,9,10-tetrahydrobenzo[a]-pyrene in human urine: evidence supporting metabolic activation of benzo[a]pyrene via the bay region diol epoxide. *Mutagenesis.* 2014. Vol. 29. № 5. P. 351–356. https://doi.org/10.1093/mutage/geu024.

Han Y., et al. Excited State Kinetics of Benzo[a]pyrene Is Affected by Oxygen and DNA. *Molecules.* 2023. Vol. 28. № 13. P. 5269. https://doi.org/10.3390/molecules28135269.

Jiang H., et al. Metabolism of benzo[a]pyrene in human bronchoalveolar H358 cells using liquid chromatography-mass spectrometry. *Chemical Research in Toxicology.* 2007. Vol. 20. № 9. P. 1331–1341. https://doi.org/10.1021/tx700107z.

Kim M., Jee S.-C., Sung J.-S. Hepatoprotective Effects of Flavonoids against Benzo[a]Pyrene-Induced Oxidative Liver Damage along Its Metabolic Pathways. *Antioxidants.* 2024. Vol. 13. № 2. P. 180. https://doi.org/10.3390/antiox13020180.

Louro H., et al. The Use of Human Biomonitoring to Assess Occupational Exposure to PAHs in Europe: A Comprehensive Review. *Toxics.* 2022. Vol. 10. № 8. P. 480. https://doi.org/10.3390/toxics10080480.

Madeen E., et al. Toxicokinetics of benzo[a]pyrene in humans: Extensive metabolism as determined by UPLC-accelerator mass spectrometry following oral micro-dosing. *Toxicology and Applied Pharmacology.* 2019. Vol. 364. P. 97–105. https://doi.org/10.1016/j.taap.2018.12.010.

Mokrzyński K., Szewczyk G., Sarna T. Benzo[a]Pyrene and Benzo[e]Pyrene: Photoreactivity and Phototoxicity toward Human Keratinocytes. *Photochemistry and Photobiology.* 2023. Vol. 99. № 3. P. 983–992. https://doi.org/10.1111/php.13721.

Rubin H. Synergistic mechanisms in carcinogenesis by polycyclic aromatic hydrocarbons and by tobacco smoke: a bio-historical perspective with updates. *Carcinogenesis.* 2021. Vol. 22. № 12. P. 1903–1930. https://doi.org/10.1093/carcin/22.12.1903.

Styszko K., Pamuła J., Pac A., Sochacka-Tatara E. Biomarkers for polycyclic aromatic hydrocarbons in human excreta: recent advances in analytical techniques-a review. *Environmental Geochemistry and Health.* 2023. Vol. 45. № 10. P. 7099–7113. https://doi.org/10.1007/s10653-023-01699-1.

Sakhno T.V., Korotkova I.V., Pustovit S.V., Borisenko A.Yu. Effect of temperature on the Fluorescence of O- and N-containing Heterocycles: XXth European Colloquium on Heterocyclic Chemistry, Stockholm, Sweden, 2002, August 18–21. P. 61.

Silveira A.L., Barbeira P.J.S. Synchronous fluorescence spectroscopy and multivariate classification for the discrimination of cachaças and rums. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy.* 2022. Vol. 270. P. 120821. https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.120821.

Thiel W. Semiempirical quantum-chemical methods. *WIREs Computational Molecular Science.* 2014. Vol. 4. № 2. P. 145–157. https://doi.org/10.1002/wcms.1161.

Yemele O.M., et al. A systematic review of polycyclic aromatic hydrocarbon pollution: A combined bibliometric and mechanistic analysis of research trend toward an environmentally friendly solution. *Science of The Total Environment.* 2024. Vol. 926. P. 171577. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171577.

Young D. Computational Chemistry: A Practical Guide for Applying Techniques to Real-World Problems. New York: Wiley-Interscience, 2001. 382 p.

Zhang X., Fales A., Vo-Dinh T. Time-Resolved Synchronous Fluorescence for Biomedical Diagnosis. *Sensors.* 2015. Vol. 15. № 9. P. 21746–21759. https://doi.org/10.3390/s150921746.

Короткова І.В., Сахно Т.В., Барашков М.М. Теоретичне дослідження процесів безвипромінбвальної дезактивації похідних ряду кумарину. *Теоретична та експериментальна хімія.* 1997. Т. 33. № 2. С. 105–110.

Сахно Т.В., Короткова І.В. Теоретичне дослідження впливу середовища на електронну будову похідних кумарину та хіноліну. *Вісник Харківського університету.* 1999. № 434. Біофізичний вісник, Вип. 3(1). С. 46–50.

References

Bukowska, B., Mokra, K., & Michałowicz, J. (2022). Benzo[*a*]pyrene-Environmental Occurrence, Human Exposure, and Mechanisms of Toxicity in International. *Journal of Molecular Sciences,* 23 (11), 6348. https://doi.org/10.3390/ijms23116348 [in English].

Christensen, A.S., Kubař, T., Cui, Q., & Elstner, M. (2016). Semiempirical Quantum Mechanical Methods for Noncovalent Interactions for Chemical and Biochemical Applications. *Chemical Reviews,* 116 (9), 5301–5337. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00584 [in English].

Ewa, B., & Danuta, M.Š. (2017). Polycyclic aromatic hydrocarbons and PAH-related DNA adducts. *Journal of Applied Genetic,* 58 (3), 321–330. https://doi.org/10.1007/s13353-016-0380-3 [in English].

Fan, Z., et al. (2018). Rapid fluorescence immunoassay of benzo[*a*]pyrene in mainstream cigarette smoke based on a dual-functional antibody-DNA conjugate. *RSC Advances,* 8 (52), 29562–29569. https://doi.org/10.1039/c8ra04915g [in English].

Fischer, J.M.F., et al. (2018). PARP1 protects from benzo[a]pyrene diol epoxide-induced replication stress and mutagenicity. *Archives of Toxicology,* 92 (3), 1323–1340. https://doi.org/10.1007/s00204-017-2115-6 [in English].

Garcia, A.L.C, et al. (2023). Metabolic Activation of Benzo[*a*]pyrene by Human Tissue Organoid Cultures. *International Journal of Molecular Sciences,* 24 (1), 606. https://doi.org/10.3390/ijms24010606 [in English].

Hecht, S.S., & Hochalter, J.B. (2014). Quantitation of enantiomers of r-7,t-8,9,c-10-tetrahydroxy-7,8,9,10-tetrahydrobenzo[a]-pyrene in human urine: evidence supporting metabolic activation of benzo[a]pyrene via the bay region diol epoxide. *Mutagenesis,* 29 (5), 351–356. https://doi.org/10.1093/mutage/geu024 [in English].

Han, Y., et al. (2023). Excited State Kinetics of Benzo[a]pyrene Is Affected by Oxygen and DNA. *Molecules,* 28 (13), 5269. https://doi.org/10.3390/molecules28135269 [in English].

Jiang, H., et al. (2007). Metabolism of benzo[a]pyrene in human bronchoalveolar H358 cells using liquid chromatography-mass spectrometry. *Chemical Research in Toxicology,* 20 (9), 1331–1341. https://doi.org/10.1021/tx700107z [in English].

Kim, M., Jee, S.-C., & Sung, J.-S. (2024). Hepatoprotective Effects of Flavonoids against Benzo[a]Pyrene-Induced Oxidative Liver Damage along Its Metabolic Pathways. *Antioxidants,* 13 (2), 180. https://doi.org/10.3390/antiox13020180 [in English].

Louro, H., et al. (2022). The Use of Human Biomonitoring to Assess Occupational Exposure to PAHs in Europe: A Comprehensive Review. *Toxics,* 10 (8), 480. https://doi.org/10.3390/toxics10080480 [in English].

Madeen, E., et al. (2019). Toxicokinetics of benzo[a]pyrene in humans: Extensive metabolism as determined by UPLC-accelerator mass spectrometry following oral micro-dosing. *Toxicology and Applied Pharmacology,* 364, 97–105. https://doi.org/10.1016/j.taap.2018.12.010 [in English].

Mokrzyński, K., Szewczyk, G., & Sarna, T. (2023). Benzo[a]Pyrene and Benzo[e]Pyrene: Photoreactivity and Phototoxicity toward Human Keratinocytes. *Photochemistry and Photobiology,* 99 (3), 983–992. https://doi.org/10.1111/php.13721 [in English].

Rubin, H. (2021). Synergistic mechanisms in carcinogenesis by polycyclic aromatic hydrocarbons and by tobacco smoke: a bio-historical perspective with updates. *Carcinogenesis,* 22 (12), 1903–1930. https://doi.org/10.1093/carcin/22.12.1903 [in English].

Styszko, K., Pamuła, J., Pac, A., & Sochacka-Tatara, E. (2023). Biomarkers for polycyclic aromatic hydrocarbons in human excreta: recent advances in analytical techniques-a review. *Environmental Geochemistry and Health,* 45 (10), 7099–7113. https://doi.org/10.1007/s10653-023-01699-1 [in English].

Sakhno, T.V., Korotkova, I.V., Pustovit, S.V., & Borisenko, A.Yu. (2002). Effect of temperature on the Fluorescence of O- and N-containing Heterocycles: XXth European Colloquium on Heterocyclic Chemistry, Stockholm, Sweden, August 18–21, 61 [in English].

Silveira, A.L., & Barbeira, P.J.S. (2022). Synchronous fluorescence spectroscopy and multivariate classification for the discrimination of cachaças and rums. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy,* 270, 120821. https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.120821 [in English].

Thiel, W. (2014). Semiempirical quantum-chemical methods. *WIREs Computational Molecular Science,* 4 (2), 145–157. https://doi.org/10.1002/wcms.1161 [in English].

Yemele, O.M., et al. (2024). A systematic review of polycyclic aromatic hydrocarbon pollution: A combined bibliometric and mechanistic analysis of research trend toward an environmentally friendly solution. *Science of The Total Environment,* 926, 171577. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171577 [in English].

Young, D. (2001). Computational Chemistry: A Practical Guide for Applying Techniques to Real-World Problems. New York: Wiley-Interscience, 382 p. [in English].

Zhang, X., Fales, A., & Vo-Dinh, T. (2015). Time-Resolved Synchronous Fluorescence for Biomedical Diagnosis. *Sensors,* 15 (9), 21746–21759. https://doi.org/10.3390/s150921746 [in English].

Korotkova, I.V., Sahno, T.V., & Barashkov, N.N. (1997). Teoreticheskoe issledovanie protsessov bezyizluchatelnoy dezaktivatsii proizvodnyih ryada kumarina [Theoretical study of non-radiative deactivation processes of coumarin derivatives]. *Teoreticheskaya i eksperimentalnaya himiya [Theoretical and experimental chemistry],* 33 (2), 105–110 [in Ukrainian].

Sahno, T.V., & Korotkova, I.V. (1999). Teoreticheskoe issledovanie vliyaniya sredyi na elektronnoe stroenie proizvodnyih kumarina i hinolina [Theoretical study of the influence of the environment on the electronic structure of coumarin and quinoline derivatives]. *Visnyk Kharkivsjkogho universytetu [Bulletin of Kharkiv University],* 434. *Biofizychnyi visnyk [Biophysical Bulletin],* 3 (1), 46–50 [in Ukrainian].

Отримано: 21.10.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

УДК 621.794.4:546.47/49'24
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.5

ХІМІЧНЕ ТРАВЛЕННЯ МОНОКРИСТАЛІВ $MN_xCD_{1-x}TE$ РОЗЧИНАМИ HNO_3 – KI – ДИМЕТИЛФОРМАМІД

Р. О. Денисюк[1], В. М. Томашик[2], М. В. Чайка[3], О. М. Камінський[4], С. В. Писаренко[5], М. М. Вовченко[6]

В умовах постійного розвитку електроніки та напівпровідникової техніки, які увійшли в кожну галузь промисловості, техніки та побут, виникає потреба у створенні надійних мікросхем, датчиків та робочих елементів. Досить широко використовуються тверді розчини на основі кадмій телуриду, які володіють здатністю проводити електричний струм під впливом коротких хвиль. Для отримання надійних приладів напівпровідникові монокристали проходять ряд механічних, хіміко-механічних та хімічних обробок з метою формування якісної полірованої поверхні майбут-

[1] 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
[2] доктор хімічних наук, професор,
провідний науковий співробітник відділу хімії і технології напівпровідників
(Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, м. Київ)
e-mail: tomashyk@isp.kiev.ua
ORCID: 0000-0002-5698-7903
[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] 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
[5] доктор філософії з галузі знань «Хімічна та біоінженерія»,
старший викладач кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: snezhunka1107@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5978-487X
[6] здобувачка освіти другого (магістерського) рівня вищої освіти
спеціальності 102 Хімія
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: vovchenkoallo19@gmail.com
ORCID: 0009-0005-1974-0660

ньої підкладки для осадження наноструктур на майбутні робочі елементи приладів. Тверді розчини $Mn_xCd_{1-x}Te$ перспективні для використання в якості розведених магнітних напівпровідників. В роботі у відтворюваних гідродинамічних умовах уперше досліджено хімічне розчинення монокристалів твердих розчинів $Mn_xCd_{1-x}Te$ (x = 0.3, 0.47, 0.5) у розчинах потрійної системи HNO_3 – KI – диметилформамід. Визначено переваги запропонованих травильні сумішей в порівнянні з вже розробленими травильними композиціями. Встановлено вплив концентрації окисника на кінетику розчинення твердих розчинів. Визначено кінетичні залежності хіміко-динамічного травлення в розроблених травильних сумішах із встановлення складів розчинів, що володіють поліруючими властивостями. Полірування поверхні монокристалів CdTe та твердих розчинів $Mn_xCd_{1-x}Te$ в запропонованих травниках може проводитись при вмісті 12–15 об. % HNO_3 з швидкістю 1,0–2,4 мкм/хв. Хіміко-динамічне полірування досліджуваними розчинами цьому швидкість полірування. За даними залежності швидкості розчинення від швидкості обертання диску для розчину складу (в об. %): 12 HNO_3 + 88 KI (ДМФА), встановлено, що процесу полірування відбувається за дифузійними механізмом, а для $Mn_{0,5}Cd_{0,5}Te$ за змішаним. Показано, що із збільшенням вмісту мангану в складі монокристалів $Mn_xCd_{1-x}Te$ зростає швидкість розчинення напівпровідників. Встановлено залежність кінетики хіміко-механічного полірування досліджуваних монокристалів від розведення органічним розчинником базового розчину При розведені поліруючого розчину лактатною кислотою до співвідношення 3 : 2 швидкість хіміко-механічного полірування зменшується від 3,0 до 0,5 мкм/хв. Встановлено значення електрохімічних потенціалів процесу розчинення твердих розчинів $Mn_xCd_{1-x}Te$ та встановлено, що під час полірування в розчин переходять відповідні катіони. Розроблено технологію хіміко-динамічного полірування монокристалів $Mn_xCd_{1-x}Te$, відповідно до якої полірування необхідно проводити в установці для хіміко-динамічного полірування за температури 293 K і швидкістю обертання диску 82 обертів на хвилину.

Ключові слова: *хімічне розчинення, кадмій манган телурид, монокристали, швидкість розчинення, травник, хіміко-динамічне полірування, хіміко-механічне полірування.*

THE CHEMICAL ETCHING OF $MN_XCD_{1-X}TE$ SINGLE CRYSTALS WITH HNO_3 – KI – DIMETHYLFORMAMIDE SOLUTIONS

R. O. Denysiuk, V. M. Tomashyk, M. V. Chayka, O. M. Kaminskiy, S. V. Pysarenko, M. M. Vovchenko

In the conditions of constant development of electronics and semiconductor technology, which has entered every branch of industry, technology and everyday life, there is need to create reliable microcircuits, sensors and working elements. Solid solutions based on cadmium telluride are widely used, which have the ability to conduct electric current under the influence of short waves. To obtain reliable devices, semiconductor single crystals undergo a number of mechanical, chemical-mechanical and chemical treatments in order to form a high-quality polished surface of the future substrate for the deposition of nanostructures on future working elements of devices. Solid solutions $Mn_xCd_{1-x}Te$ are promising for use as diluted magnetic semiconductors.

The chemical dissolution of CdTe single crystals, and $Mn_xCd_{1-x}Te$ solid solutions (x = 0.3, 0.47, 0.5) in HNO_3 – KI – dimethylformamide(DMF) solutions has been investigated under reproducible hydrodynamic conditions for the first time. It is shown that the proposed etching compositions have a number of advantages compared to already developed etching mixtures. The influence of the oxidant concentration on the kinetics of dissolution of solid solutions has been established. The kinetic dependences of chemical-dynamic etching in the developed etching mixtures has been determined to establish the compositions of solutions that have polishing properties. Polishing the surface of CdTe single crystals and solid solutions of $Mn_xCd_{1-x}Te$ in the proposed etchant can be carried out at a content of 12–15 vol. % HNO_3 at a speed of 1.0–2.4 μm/min. Chemical-dynamic polishing with the investigated solutions is the polishing speed. Based on the results of the dependence of the dissolution rate on the disk rotation speed for the solution of the composition (in vol. %): 12 HNO_3 + 88 KI (DMF), it has been established that the polishing process occurs by the diffusion mechanism, and for $Mn_{0.5}Cd_{0.5}Te$ by the mixed mechanism. It is shown that with an increase in the manganese content in the composition of $Mn_xCd_{1-x}Te$ single crystals, the dissolution rate of semiconductors increases. The dependence of the kinetics of chemical-mechanical polishing of the studied single crystals on the dilution of the base solution with an organic solvent was established. When the polishing solution is diluted with lactic acid to a ratio of 3 : 2, the speed of chemical-mechanical polishing decreases from 3.0 to 0.5 μm/min. The values of the electrochemical potentials of the dissolution process $Mn_xCd_{1-x}Te$ solid solutions were measured and it was established that the corresponding cations pass into the solution during polishing. The technology for chemical-dynamic polishing of MnxCd1-xTe single crystals has been

developed, according to which polishing must be carried out in a chemical-dynamic polishing installation at a temperature of 293 K and a disk rotation speed of 82 $^{-1}$.

Key words: *chemical dissolution, cadmium telluride, single crystals, dissolution rate, etching, chemical-dynamic polishing, chemical-mechanical polishing.*

Вступ

Сполуки типу $A^{II}B^{VI}$ часто володіють напівпровідниковими властивостями. Так кадмій телурид і тверді розчини на його основі використовуються в якості робочих частин фоточутливих приладів, сонячних елементів, що працюють в інфрачервоній (ІЧ), рентгенівській (Х) області спектра, чутливі до радіаційних частинок (γ). Детектори на основі CdTe та твердих розчинів $Mn_xCd_{1-x}Te$ мають ряд переваг у порівнянні з типовими кремнієвими *p*- і *n*-діодами (Чайка та ін., 2018; Chayka et al., 2022).

Технологія підготовки напівпровідникових пластин під час виробництва сучасної електроніки в якості робочих елементів та інтегральних мікросхем передбачає використання хімічних реагентів для фінішної та міжопераційної обробки поверхні монокристалічних пластин. Метою використання хімічного та хіміко-механічного полірування є знімання певної частини поверхні монокристалу, який змінює структуру в ході механічної обробки та надання монокристалу необхідної форми і структури поверхні. Велике значення приділяється формуванню якості полірованої поверхні, оскільки від цього залежить робота напівпровідникових приладів, а також тривалість їх використання (Nelson et al., 2009; Crocco et al., 2012). Хімічне травлення поверхні матеріалів є однією із поширених операцій під час підготовки напівпровідникових матеріалів у промислових масштабах, оскільки забезпечує швидку та відносно просту у виконанні обробку поверхні матеріалу з надійною відтворюваністю при незначних економічних затратах, що робить його універсальним в технології підготовки поверхні матеріалів.

У літературі описано використання хіміко-динамічного (ХДП) (Denysyuk et al., 2009; Гвоздієвський та ін., 2013; Чайка та ін., 2018) та хіміко-механічне полірування (ХМП) (Денисюк, 2014) поверхні напівпровідникових матеріалів на основі CdTe, в тому числі $Mn_xCd_{1-x}Te$. Травильні суміші, які пропонуються для хімічного полірування, виготовляються на основі галогенідних кислот: бромідної (Чайка та ін., 2018; Chayka et al., 2019; Chayka et al., 2022) або йодидної кислоти (Denysyuk, 2014; Hvozdiyevskyi et al., 2018). В якості окисника, з метою отримання вільного галогену в травильній композиції використовується HNO_3, H_2O_2, $K_2Cr_2O_7$ (Денисюк та ін., 2012; Гвоздієвський та ін., 2016; Chayka et al., 2022). Бромвиділяючі травильні суміші, які передбачають використання надлишку бромідної кислоти, володіють швидкостями полірування в межах 1–10 мкм/хв щодо поверхні CdTe та твердих розчинів $Zn_xCd_{1-x}Te$ і $Cd_xHg_{1-x}Te$. (Чайка та ін., 2018; Chayka et al., 2022). Йодвиділяючі розчини з надлишком йодидної кислоти полірують поверхні CdTe та твердих розчинів $Mn_xCd_{1-x}Te$ із швидкостями 3–15 мкм/хв. (Denysyuk, 2014). Використання нітратної кислоти та гідроген пероксиду в якості окисника HI дозволяє отримати травильні суміші, що володіють менш агресивні реагенти в порівнянні з бромвиділяючими (Денисюк та ін., 2023).

Відомі травильні композиції, які можуть бути використані для хімічного полірування поверхні монокристалів CdTe та твердих розчинів на його основі, передбачають створення кислого pH середовище, яке створюється або галогенідними кислотам або нітратною кислотою, утворення вільного галогену та використання відповідних гідродинамічних умов, що все разом створює необхідні умови для рівномірного розчинення поверхні.

Матеріал і методи

Запропоновано використовувати галогенвиділяючі розчини в якості травильних композицій, що володіють поліруючими властивостями з низькими швидкостями розчинення напівпровідникових матеріалів складу $Mn_xCd_{1-x}Te$, які є дешевими, менше забруднюють навколишнє середовище та можна використовувати в промислових масштабах. Використано реакцію отримання вільного йоду в ході окиснення калій йодиду нітратною кислотою:

$$6KI + 8HNO_3 = 3I_2 + 2NO + 6KNO_3 + 4H_2O$$

Розчинником калій йодиду є диметилформамід, тому продукти взаємодії також будуть в ньому розчинятися. Йод, що утворюється в результаті реакції добре розчин-

ний в диметилформаіді (Malanych et al., 2023). Попередні дослідження показали, що запропоновані розчини можуть бути використані для полірування монокристалів на основі кадмій телуриду (Денисюк та ін., 2023).

Для дослідження використано нелеговані монокристалічні зразки CdTe, $Mn_xCd_{1-x}Te$ (де x = 0.3; 0.47; 0.5) вирощені методом Бріджмена. Для експерименту виготовляли пластини площею 0,5 $см^2$ та товщиною 1,5–2,0 мм, що вирізались із монокристалічних зливків струнною різкою з алмазним напиленням, яка постійно змочувалась дистильованою водою. Дефектні шари, що утворюються при різанні та шліфуванні видалялись шляхом механічного полірування зразків. Механічно поліровані поверхні мають порушений приповерхневий шар товщиною близькою до товщини порушеної поверхні при хімічному травлені та подібною структурою (Чайка та ін., 2018; Chayka et al., 2022). Перед виконанням експерименту поверхню напівпровідникових пластин протравлювали травником на основі I_2 в диметилформаміді з метою розчинення поверхневого шар товщиною 40–100 мкм, що утворюється в ході механічної обробки монокристалу (Денисюк та ін., 2023).

Забезпечення відтворюваних гідродинамічних умов здійснено шляхом використанням методу диску, що обертається на установці для ХДП. Кінетику розчинення напівпровідникових матеріалів CdTe та твердих розчинів $Mn_xCd_{1-x}Te$ у травильних композиціях HNO_3 – KI – ДМФА досліджено при T = 283–300 K та швидкості обертання диску γ = 24–103 $хв^{-1}$. Одночасно розчинялись 4 монокристали, які були закріплені у фторопластовий тримач та утримувались у ньому зовнішнім кільцем. Конструкція фторопластового тримача дозволяє розміщувати напівпровідникові пластини в одній площині та уникати можливих турбулентних потоків при одночасній рівномірній подачі травильних сумішей.

Хіміко-механічне полірування здійснено на скляному полірувальнику, який покритий батистом та змочений досліджуваним травильним розчином. Необхідна в'язкість та змочуваність полірувальника підтримувалась подачею травильної суміші із швидкістю 1–2 мл/хвилину. Кінетика розчинення напівпровідників під час ХДП та ХМП розраховувалась за зменшенням товщини пластин до і після взаємодії з травником за допомогою годинникового індикатора 1-МИГП з точністю ± 0,5 мкм (Чайка та ін., 2020).

ХДП проводили в розчинниках, які формувались змішуванням 21 мас. % розчину KI в ДМФА [$(CH_3)_2NCOH$)] з 70 мас. % HNO_3. Для ХМП виготовлявся базовий розчин, в об. %: 12% HNO_3 + 88% KI (ДМФА), який розводився 80% лактатною кислотою ($C_3H_6O_3$). Важливим етапом є очистка поверхні монокристалів після хімічної взаємодії з травильною композицією від вільного йоду, що реалізується промиванням 0,2 М розчином $Na_2S_2O_3$ та великою кількістю дистильованої води (Чайка та ін., 2018) (всі реактиви марки «х.ч.»).

$$I_2 + Na_2S_2O_3 = NaI + Na_2S_4O_6$$

Мікроструктуру поверхні зразків після травлення досліджували в білому світлі за допомогою металографічного мікроскопу МИМ-7 з цифровою відеокамерою eTREK DCM800 (8Mpix).

Для проведення електрохімічних досліджень виготовлено точкові електроди з монокристалів CdTe та твердих розчинів $Mn_xCd_{1-x}Te$, які за допомогою індію припаяно до мідного провідника. Перед дослідженням електроди протравлено полірующим травником і промито 0,2 М розчином натрій тіосульфату ($Na_2S_2O_3$) та великою кількістю води. Електродом порівняння слугував насичений хлор-срібний електрод з потенціалом 0,2445 еВ. Електродні потенціали виміряно та записано на персональний комп'ютер з інтервалом в 1 секунду за допомогою іонометра И-160М. Після вимірювання значення потенціалу перераховувано на значення стандартного водневого електроду.

Результати

Швидкість хімічної взаємодії з поверхнею монокристалічного напівпровідникового матеріалу є визначальною для використання того чи іншого травника. Концентраційний інтервал досліджуваних розчинів визначено з урахуванням формування двофазних композицій та сумішей, які не володіють травильними властивостями. В роботі (Денисюк та ін., 2023) показано, що ході приготування травильних сумішей шляхом додавання більше 15 об. % HNO_3 призводить до випадіння білого кристалічного осаду.

Залежності швидкості розчинення CdTe (1), $Mn_{0,3}Cd_{0,7}Te$ (2), $Mn_{0,43}Cd_{0,57}Te$ (3), $Mn_{0,5}Cd_{0,5}Te$ (4) від вмісту нітратної кислоти

в травильних сумішах на основі KI в ДМФА (рис. 1) досліджували з використанням установки для ХДП при T = 293 ± 0,5 K і швидкості обертання диску 82 хв$^{-1}$. Аналіз отриманої залежності показує, що збільшення вмісту нітратної кислоти в KI – ДМФА призводить до збільшення швидкості розчинення монокристалів від 0,8 до 2,4 мкм/хв. Концентрація HNO_3 в суміші також впливає на якість поверхні напівпровідника, що обробляється. Розчинення досліджуваних напівпровідників в травильних композиціях, що містять 3–6 об. % HNO_3 формують поверхню, що вкривається сірим нальотом. Поліруючими властивостями володіють розчини з вмістом вмістом HNO_3 9–15 об. %, а швидкості травлення становлять 1,6–2,4 мкм/хв.

Із рис. 1 видно, що кінетика розчинення для монокристалів CdTe та твердих розчинів $Mn_xCd_{1-x}Te$ є однотипова, при чому швидкості травлення мають досить близькі значення. Аналізуючи представлені залежності, помітно, що CdTe має найбільші швидкості розчинення у порівнянні з твердими розчинами на його основі. Також встановлено, що швидкість травлення зростає зі збільшенням вмісту Mn у твердому розчині $Mn_xCd_{1-x}Te$. Це може бути пов'язано із розупорядкуванням структури кристалічної ґратки CdTe за рахунок послаблення зв'язків в кристалі.

Розрахунок кількісного співвідношення HNO_3 та KI у досліджуваних травильних композиціях показує, що поверхня монокристалів стає полірованою в розчинах, що містять надлишок нітратної кислоти, яка використовується і на окиснення калій йодиду і для створення кислого pH-середовища травника.

Для поліруючого розчину, що має склад (в об. %) 12% HNO_3 + 88% 21%-KI в ДМФА побудована залежність швидкості травлення від швидкості обертання диску (рис. 2). Встановлено, що полірування CdTe відбувається з лімітуванням дифузійними стадіями процесу розчинення, оскільки відповідна пряма екстраполюється в початок координат.

Помітно, що відповідні прямі для напівпровідників $Cd_{0,7}Mn_{0,3}Te$ та $Cd_{0,57}Mn_{0,43}Te$ прямують в початок координат, що свідчить про проходження процесу полірування з обмеженням швидкості процесами дифузії.

У випадку твердого розчину $Cd_{0,5}Mn_{0,5}Te$, спостерігаємо, що пряма залежності відтинає відрізок осі ординат. Це може свідчити про лімітування процесу полірування як дифузійними так і кінетичними стадіями.

Хіміко-механічне полірування поверхні твердих розчинів $Mn_xCd_{1-x}Te$ досліджували з використанням базового розчину складу (в об. %): 12 HNO_3 + 88 KI (ДМФА). Проведення ХМП передбачає, крім хімічного впливу на поверхню монокристалічних пластин, наявність додаткового механічного впливу, що призводить до зростання швидкості розчинення досліджуваних під-

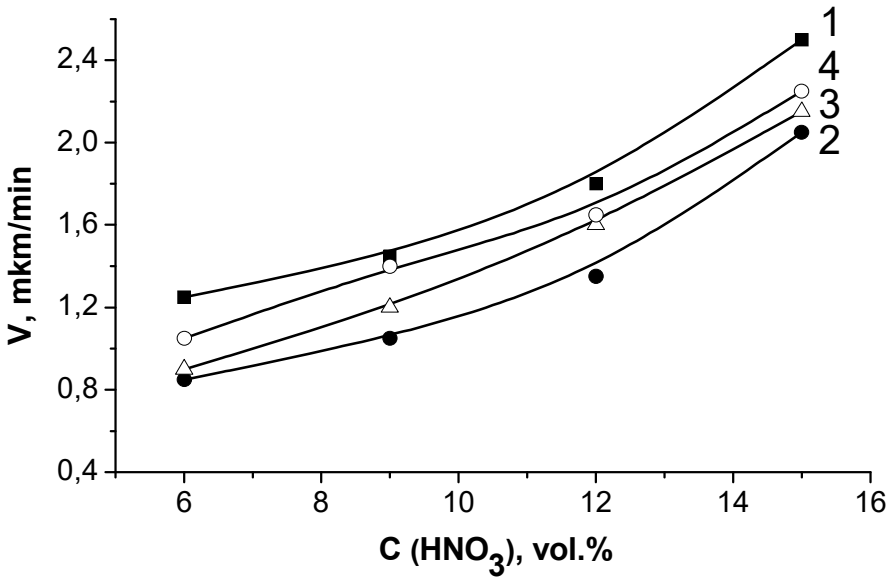


Рис. 1. Концентраційні залежності швидкості травлення (мкм/хв) CdTe (*1*), $Mn_{0,3}Cd_{0,7}Te$ (*2*), $Mn_{0,47}Cd_{0,53}Te$ (*3*), та $Mn_{0,5}Cd_{0,5}Te$ (*4*) в розчинах HNO_3 – KI – DMFA (T = 293 K, γ = 82 хв$^{-1}$)

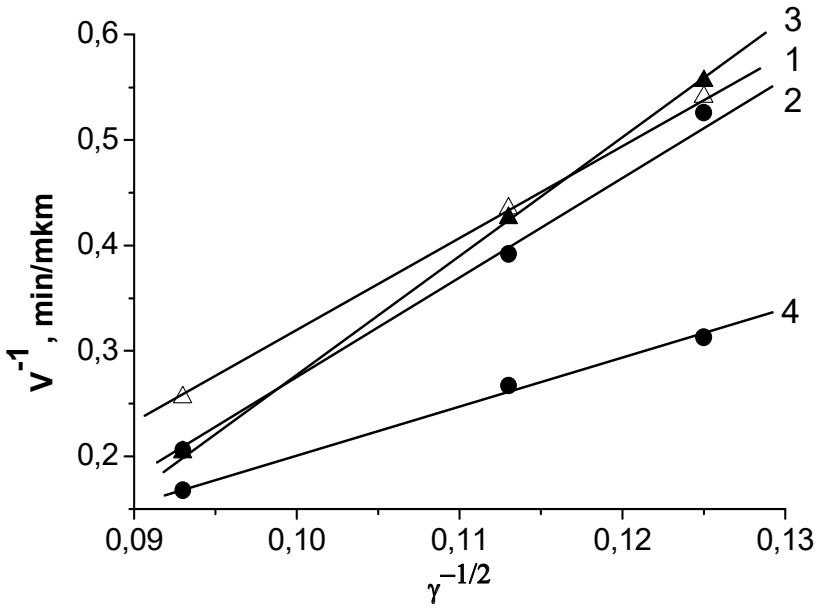


Рис. 2. Залежність швидкості розчинення CdTe (*1*), $Mn_{0,3}Cd_{0,7}Te$ (*2*), $Mn_{0,43}Cd_{0,57}Te$ (*3*) та $Mn_{0,5}Cd_{0,5}Te$ (*4*) від швидкості перемішування (T = 291K) в розчині з об. %: 12% HNO_3 + 88% (21 мас. % KI в ДМФА)

кладок. Додавання органічного розчинника дозволяє змінювати концентрацію виділеного йоду у розчині, збільшує в'язкість травника, що сприяє проходженню дифузійних процесів у ході ХМП, тому обраний базовий розчин розводили 80%-вою лактатною кислотою (Денисюк, 2014).

Додавання лактатної кислоти до базового травника призводить до зменшення концентрації окисників у травильній суміші, що сповільнює кінетику розчинення твердих розчинів $Mn_xCd_{1-x}Te$ до 0,5 мкм/хв і набуває мінімального значення при розведені суміші травник – лактатна кислота у співвідношенні 3 : 2 (рис. 3). При цьому поверхня пластин залишається якісною та полірованою. Встановлено, що як і для ХДП швидкості полірування зростають із збіль-

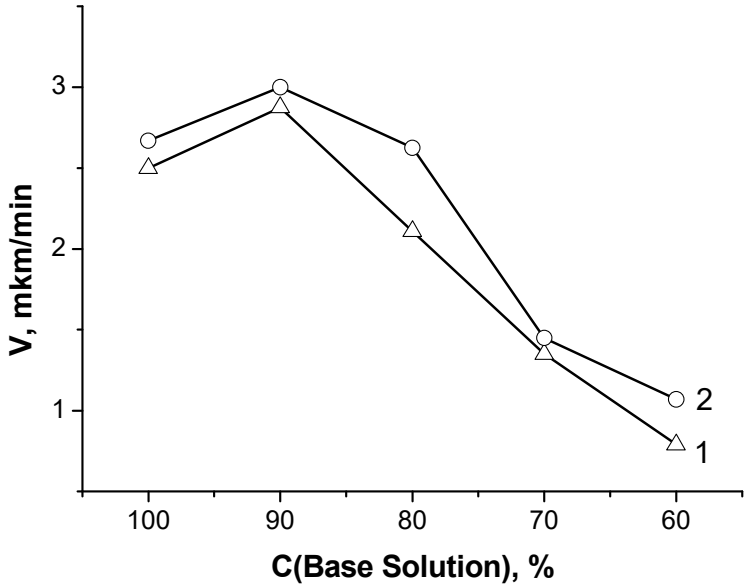


Рис. 3. Залежність швидкості хіміко-механічного полірування $Mn_{0,3}Cd_{0,7}Te$ (*1*), $Mn_{0,5}Cd_{0,5}Te$ (*2*) від розведення базового розчину [в об. %: 12% HNO_3 + 88% KI (ДМФА)] лактатною кислотою

шенням вмісту мангану в твердому розчині. Спостерігається незначне зростання швидкості розчинення монокристалів при розведенні базового розчину лактатною кислотою, що може бути пов'язано із введенням в травильну суміш не лише в'язкого компоненту, а й компоненту, який сприяє утворенню комплексних сполук з продуктами взаємодії, створює додаткове кисле середовище, що прискорює розчинення напівпровідників.

Розроблені на основі сумішей HNO_3 – KI – ДМФА травильні розчини можуть бути використання для фінішного ХДП та ХМП твердих розчинів $Mn_xCd_{1-x}Te$ з метою отримання заданої шорсткості та мікроструктури поверхні.

Метод диску, що обертається забезпечує відтворювані гідродинамічні умови для ХДП монокристалів CdTe та твердих розчинів $Mn_xCd_{1-x}Te$ травниками системи HNO_3 – KI – DMFA, при чому температура має становити 293 K, а швидкості обертання диску γ = 82 хв$^{-1}$. Після хімічного травлення поверхню монокристалу потрібно нейтралізувати від залишків травника у 0,2 М водному розчині $Na_2S_2O_3$ та промити дистильованою водою.

ХМП досліджуваних напівпровідникових матеріалів у вигляді тонких плівок можна проводити з використанням травильної композиції зі співвідношенням компонентів (в об. %): 12 HNO_3 + 88 KI (ДМФА) та швидкістю полірування 3,0–0,5 мкм/хв. При цьому отримуємо поверхню високої якості. Швидкість полірування твердих розчинів $Mn_xCd_{1-x}Te$ можна контролювати шляхом розведення 80-вою лактатною кислотою.

Електрохімічні дослідження показали, що електрохімічні потенціали мають додатні значення. Побудовано залежність середніх значень електродних потенціалів розчинення монокристалів CdTe та твердих розчинів $Mn_xCd_{1-x}Te$ (x = 0,3; 0,43; 0,5) від концентрації HNO_3 в травильному розчині (рис. 4). З графіку видно, що електрохімічні потенціали зростають із збільшенням концентрації окисника в травильній композиції від 0,318 В до 0,520 В.

Визначено, що при збільшенні концентрації мангану у твердому розчині $Mn_xCd_{1-x}Te$ (x = 0,3; 0,43; 0,5) значення електрохімічного потенціалу зменшується. Це пояснюється більшою активністю мангану в порівнянні з кадмієм.

Для травильних розчинів, що володіють поліруючими властивостями з вмістом 12 об. %–15 об. % нітратної кислоти спостерігаємо зростання значень електрохімічних потенціалів від 0,342 В до 0,520 В.

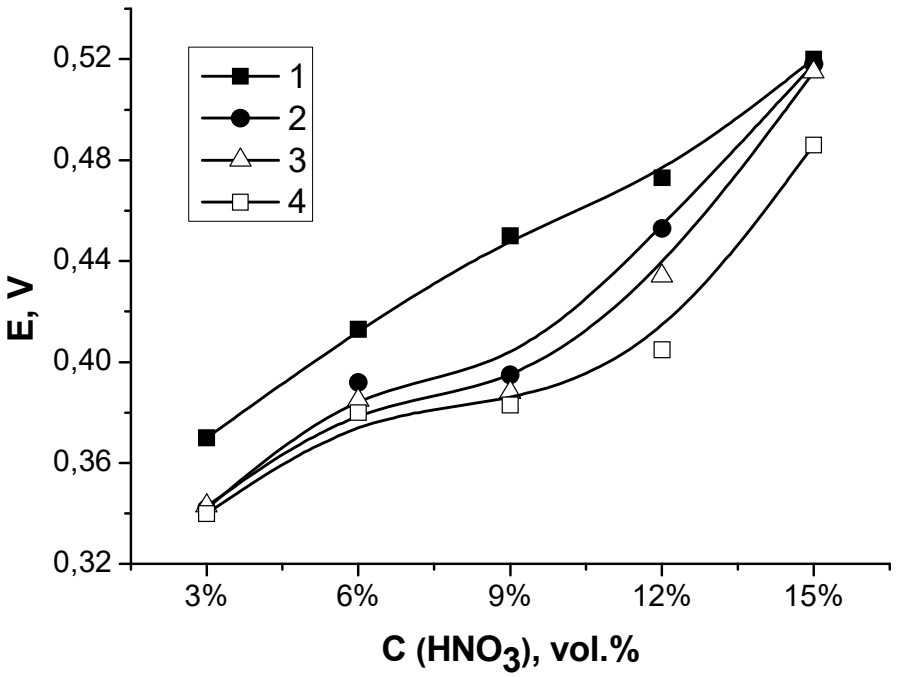


Рис. 4. Залежності значень електрохімічних потенціалів (В) CdTe (*1*), $Mn_{0,3}Cd_{0,7}Te$ (*2*), $Mn_{0,47}Cd_{0,53}Te$ (*3*), та $Mn_{0,5}Cd_{0,5}Te$ (*4*) від концентрації нітратної кислоти в розчинах HNO_3 – KI – DMFA (T = 293 K)

Отримані результати порівняно з діаграмою Пурбе (Dremlyuzhenko et al., 2007) (рис. 5). Встановлено, що в кислому середовищі (pH = -2–0) при значеннях E = 0,1–0,6 В утворюються йони Cd^{2+}, Mn^{2+}, Te^{4+}.

Тому зроблено висновок, що процес хімічного розчинення CdTe та твердих розчинів $Mn_xCd_{1-x}Te$ проходить за такими схемами:

$$CdTe + 3I_2 \rightarrow CdI_2 + TeI_4$$

$$Mn_xCd_{1-x}Te + 3I_2 \rightarrow xMnI_2 + (1-x)CdI_2 + TeI_4$$

Висновки

Досліджено процес хімічного розчинення монокристалів твердих розчинів $Mn_xCd_{1-x}Te$ у травильних композиціях HNO_3 – KI – ДМФА з використанням методу диску, що обертається. Хіміко-динамічне полірування запропонованими травильними композиціями можна проводити при об'ємному вмісті HNO_3 9–15%, при цьому швидкість полірування поверхні твердих розчинів $Mn_xCd_{1-x}Te$ становить 1,0–2,4 мкм/хв. Встановлено збільшення кінетики розчинення досліджуваних напівпровідникових матеріалів під час хіміко-динамічного поліруванні від 0,8 до 2,4 мкм/хв із збільшенням концентрації нітратної кислоти у травильній суміші. Визначено, що збільшення концентрації мангану у твердому розчині $Mn_xCd_{1-x}Te$ призводить до зростання швидкості розчинення монокристалу за однакових умов хіміко-динамічного травлення. Встановлено залежність значень електродних потенціалів процесів саморозчинення від складу травильних композицій. Показано, що продуктами розчинення є йони Cd^{2+}, Mn^{2+}, Te^{4+}, що свідчить про рівномірне розчинення монокристалу і можливість формування якісної полірованої поверхні в ході травлення розчинами системи HNO_3 – KI – ДМФА. Із залежностей кінетики розчинення від швидкості обертання диску в поліруючому розчині складу (в об. %) 12 HNO_3 + 88 KI (ДМФА) встановлено, що лімітування процесу відбувається дифузійними стадіями, а для твердого розчину $Cd_{0,5}Mn_{0,5}Te$ полірування відбувається за змішаним механізмом. Встановлено залежність кінетики хіміко-механічного полірування досліджуваних монокристалів від розведення органічним розчинником базового розчину. Розведення базового поліруючого розчину лактатною кислотою

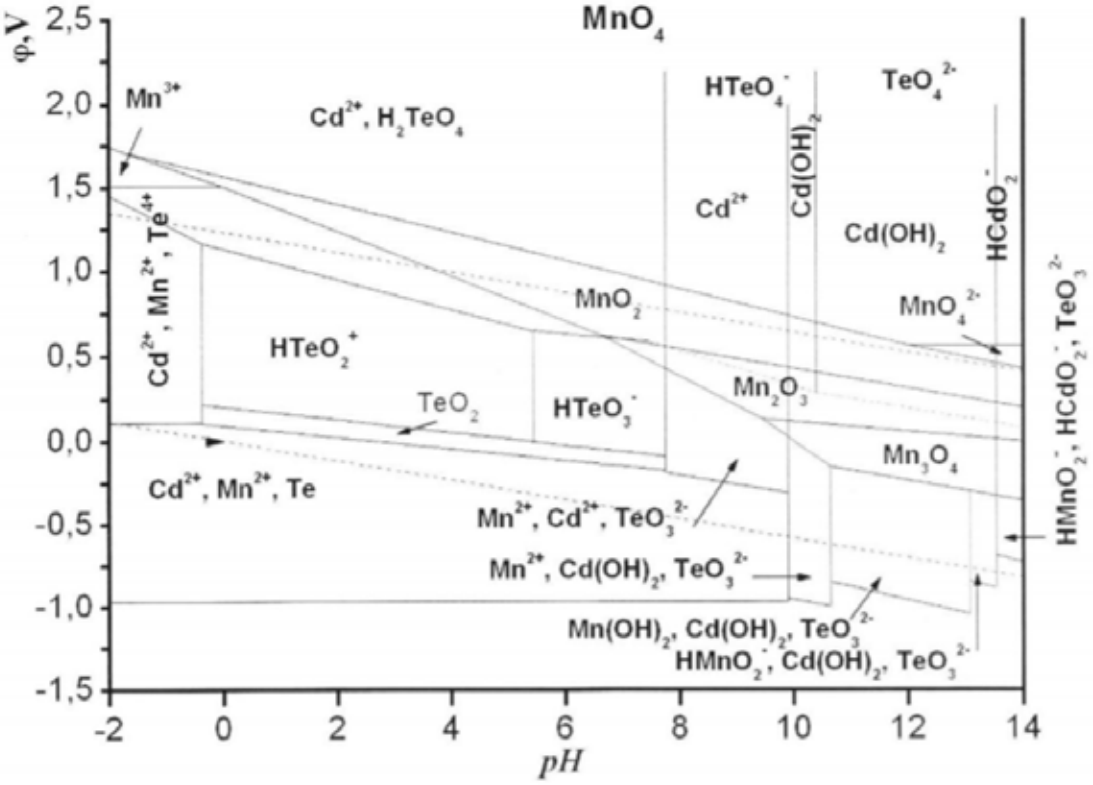


Рис. 5. Діаграма Пурбе системи $Cd_{0.5}Mn_{0.5}Te$-H_2O (Dremlyuzhenko et al., 2007)

формує поліруючі травильні суміші, що якісно обробляють поверхню з швидкістю 0,5–3,0 мкм/хв. Розроблено технологію хіміко-динамічного полірування монокристалів $Mn_xCd_{1-x}Te$, відповідно до якої полірування необхідно проводити в установці для ХДП за температури 293 К і швидкістю обертання диску 82 хв[1]. Під час фінішного травлення рекомендовано хіміко-механічне полірування з додаванням лактатної кислоти до базового розчину, що містить (в об. %) 12 HNO_3 + 88 KI (ДМФА).

Список використаної літератури

Гвоздієвський Є.Є., Денисюк Р.О., Томашик В.М., Томашик З.Ф., Гриців В.І. Хімічне полірування CdTe та твердих розчинів $Zn_xCd_{1-x}Te$ і $Cd_{1-x}Hg_xTe$ водними розчинами HNO_3 – HI – тартратна кислота. *Науковий вісник Чернівецького університету.* 2013. № 658. С. 136–140.

Гвоздієвський Є.Є., Денисюк Р.О., Томашик В.М., Томашик З.Ф. Хімічна обробка CdTe та твердих розчинів $Zn_xCd_{1-x}Te$ і $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ водними розчинами HNO_3 – HI – лактатна кислота. *Фізика і хімія твердого тіла.* 2016. Т. 17. № 2. С. 247–250. https://doi.org/10.15330/pcss.17.2.247-250.

Гвоздієвський Є.Є., Денисюк Р.О., Томашик В.М., Томашик З.Ф. Травлення монокристалів CdTe, $Zn_xCd_{1-x}Te$ і $Cd_xHg_{1-x}Te$ водними розчинами HNO_3 – HI – гліцерин. *Фізика і хімія твердого тіла.* 2017. Т. 18. № 1. С. 117–121. https://doi.org/10.15330/pcss.18.1.117-121.

Денисюк Р.О., Томашик В.М., Томашик З.Ф., Гриців В.І. Хімічна взаємодія $Cd_{1-x}Mn_xTe$ з травильними композиціями H_2O_2 – HI – лактатна кислота. *Фізика і хімія твердого тіла.* 2012. Т. 13. № 2. С. 410–414.

Денисюк Р.О. Хіміко-механічне полірування $Cd_{1-x}Mn_xTe$ розчинами на основі H_2O_2 – HI – цитратна кислота. *Фізика і хімія твердого тіла.* 2014. Т. 15. № 1. С. 214–218.

Денисюк Р., Томашик В., Камінський О., Шелюк І., Писаренко С., Марценюк О. Хімічне травлення монокристалів CdTe, $Zn_xCd_{1-x}Te$ та $Cd_xHg_{1-x}Te$ розчинами HNO_3 – KI – диметилформамід. *Український журнал природничих наук.* 2023. № 3. С. 155–166.

Чайка М.В., Томашик З.Ф., Томашик В.М., Маланич Г.П., Денисюк Р.О. Хімічне травлення монокристалів CdTe, $Zn_xCd_{1-x}Te$ та $Cd_xHg_{1-x}Te$ водними розчинами $K_2Cr_2O_7$ – HBr – ацетатна кислота. *Науковий вісник Чернівецького університету.* 2018. № 805. С. 46–52.

Chayka M.V., Tomashyk Z.F., Tomashyk V.M., Malanych G.P., Korchovyi A.A. Optimization of bromine-emerging etching compositions $K_2Cr_2O_7$ – HBr – ethylene glycol for forming a polished surface of CdTe, $Zn_xCd_{1-x}Te$ and $Cd_xHg_{1-x}Te$. *Functional Materials.* 2019. Vol. 26. № 1. P. 189–196. https://doi.org/10.15407/fm26.01.189.

Chayka M.V., Tomashyk Z.F., Tomashyk V.M., Malanych G.P., Korchovyi A.A. Chemical-mechanical polishing of CdTe, $Zn_xCd_{1-x}Te$ and $Cd_xHg_{1-x}Te$ single crystal surfaces by $K_2Cr_2O_7$ – HBr – solvent etchants. *Functional Materials.* 2019. Vol. 26. № 2. P. 412–418. https://doi.org/10.15407/fm26.02.412.

Chayka M.V., Tomashyk Z.F., Tomashyk V.M., Malanych G.P., Korchovyi A.A. Peculiarities of nanosized relief formation on the $Cd_xHg_{1-x}Te$ single crystals surface using $K_2Cr_2O_7$ – HBr – solvent etchants. *Functional Materials.* 2022. Vol. 29. № 2. P. 305–313. https://doi.org/10.15407/fm29.02.305.

Chayka M., Tomashyk Z., Tomashyk V., Malanych G., Korchovyi A. Formation of nanosized relief on the CdTe single crystals surface by bromine-emerging etchants. *Applied Nanoscience.* 2022. V. 12. № 3. P. 603–609. https://doi.org/10.1007/s13204-021-01716-8.

Crocco J., Zheng Q., Bensalah H., Dieguez E Detector surface preparation of $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$ for electrode patterning. *Applied Surface Science.* 2012. Vol. 258. P. 2948–2952. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.11.014.

Denysyuk R.O. Chemical treatment of $Cd_{1-x}Mn_xTe$ single crystals with H_2O_2 – HI – citric acid aqueous solutions. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics.* 2014. Vol. 17. № 1. P. 21–24.

Denysyuk R.O., Tomashik V.M., Tomashik Z.F., Chernyuk O.S., Grytsiv V.I. Chemical treatment of monocrystalline cadmium telluride and $Cd_{1-x}Mn_xTe$ solid solutions by H_2O_2 – HI – citratic acid etchant compositions. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics.* 2009. Vol. 12. № 2. P. 125–128.

Dremlyuzhenko S.G., Zakharuk Z.I., Savchuk A.I., Fochuk P.M. Effect of treatment on the CdTe, $Cd_{1-x}Mn_xTe$ and $Cd_{1-x}Zn_xTe$ surface stoichiometry. *Physica Status Solidi. B, Basic Research.* 2007. Vol. 244 (5). P. 1650–1654. https://doi.org/10.1002/pssb.200675124.

Hvozdiyevskyi Ye.Ye., Denysyuk R.O., Tomashyk V.M., Malanych G.P., Tomashyk Z.F. Interaction of HNO_3 – HI – citric acid aqueous solutions with CdTe, $Zn_{0.04}Cd_{0.96}Te$, $Zn_{0.1}Cd_{0.9}Te$ and $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$ semiconductors. *Functional Materials.* 2018. Vol. 25. № 3. P. 471–476. https://doi.org/10.15407/fm25.03.471.

Malanych G., Tomashyk V., Korchovyi A., Sabov T. Chemical interaction of the GaAs, GaSb, InAs, and InSb single crystals surface with I_2 + DMF (methanol) etchants. *Applied Nanoscience (Switzerland).* 2023. № 13 (10). P. 7047–7056. https://doi.org/10.1007/s13204-023-02870-x.

Nelson A.J., Conway A.M., Reinhardt C.E., Ferreira J.L., Nikolic R.J., Payne S.A. X-ray photoemission analysis of passivated $Cd_{(1-x)}Zn_xTe$ surfaces for improved radiation detectors. *Materials Letters.* 2009. Vol. 63. P. 180–181. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.09.051.

References

Hvozdiyevskyi, Ye.Ye., Denysyuk, R.O., Tomashyk, V.M., Tomashyk, Z.F., & Grytsiv, V.I. (2013). Khimichne poliruvannia SdTe ta tverdykh rozchyniv $Zn_xCd_{1-x}Te$ i $Cd_{1-x}Hg_xTe$ vodnymy rozchynamy HNO_3 – HI – tartratna kyslota [Chemical polishig of CdTe and solid solution $Zn_xCd_{1-x}Te$ and $Cd_{1-x}Hg_xTe$ be the HNO_3 – HI – tartaric acid aqueous solutions]. *Naukovyi visnyk Chernivetskoho universytetu.: Khimiia [Scientific Bulletin of Chernivtsi University: Chemistry],* 658, 136–140 [in Ukrainian].

Hvozdiyevskyi, Ye.Ye., Denysyuk, R.O., Tomashyk, V.M., & Tomashyk, Z.F. (2016). Khimichna obrobka CdTe ta tverdykh rozchyniv $Zn_xCd_{1-x}Te$ i $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ vodnymy rozchynamy HNO_3 – HI – laktatna kyslota [Chemical treatment of CdTe and solid solution $Zn_xCd_{1-x}Te$ and $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ by the HNO_3–HI–lactate acid aqueous solutions]. *Fizyka i khimiia tverdoho tila [Physics and Chemistry of Solid State],* 17 (2), 247–250. https://doi.org/10.15330/pcss.17.2.247-250 [in Ukrainian].

Hvozdiyevskyi, Ye.Ye., Denysyuk, R.O., Tomashyk, V.M., & Tomashyk, Z.F. (2017). Travlennia monokrystaliv CdTe, $Zn_xCd_{1-x}Te$ i $Cd_xHg_{1-x}Te$ vodnymy rozchynamy HNO_3 – HI – hlitseryn [Chemical polishig of CdTe and solid solution $Zn_xCd_{1-x}Te$ and $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$ by the HNO_3 – HI – glycerin acid aqueous solutions]. *Fizyka i khimiia tverdoho tila [Physics and Chemistry of Solid State],* 18 (1), 117–121. https://doi.org/10.15330/pcss.18.1.117-121 [in Ukrainian].

Denysyuk, R.O., Tomashik, V.M., Tomashik, Z.F., & Grytsiv V.I. (2012). Khimichna vzaiemodiia $Cd_{1-x}Mn_xTe$ z travylnymy kompozytsiiamy H_2O_2 – HI – laktatna kyslota [Chemical interaction of $Cd_{1-x}Mn_xTe$ with H_2O_2–HI–lactic acid ($C_3H_6O_3$) etchant compositions]. *Fizyka i khimiia tverdoho tila [Physics and Chemistry of Solid State],* 13 (2), 410–414 [in Ukrainian].

Denysyuk, R.O. (2014). Khimiko-mekhanichne poliruvannia $Cd_{1-x}Mn_xTe$ rozchynamy na osnovi H_2O_2 – HI – tsytratna kyslota [Chemical and mechanical polishing of $Cd_{1-x}Mn_xTe$ by solutions based on H_2O_2–HI–citric acid]. *Fizyka i khimiia tverdoho tila [Physics and Chemistry of Solid State],* 15 (1), 214–218 [in Ukrainian].

Denysiuk, R., Tomashyk, V., Kaminskyi, O., Sheliuk, I., Pysarenko, S., & Martseniuk, O. (2024). Khimichne travlennia monokrystaliv CdTe, $Zn_xCd_{1-x}Te$ ta $Cd_xHg_{1-x}Te$ rozchynamy HNO_3 – KI – dymetylformamid [The chemical etching of CdTe, $Zn_xCd_{1-x}Te$ and $Cd_xHg_{1-x}Te$ single crystals with HNO_3 – KI – dimethylformamide solutions]. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychykh nauk [Ukrainian Journal of Natural Sciences],* 3, 155–166. https://doi.org/10.35433/naturaljournal.3.2023.155-166 [in Ukrainian].

Chayka, M.V., Tomashyk, Z.F., Tomashyk, V.M., Malanych, G.P., & Denysyuk, R. O. (2018). Khimichne travlennia monokrystaliv CdTe, $Zn_xCd_{1-x}Te$ ta $Cd_xHg_{1-x}Te$ vodnymy rozchynamy $K_2Cr_2O_7$ – HBr – atsetatna kyslota [The chemical etching of the CdTe, $Zn_xCd_{1-x}Te$ and $Cd_xHg_{1-x}Te$ single crystals with the $K_2Cr_2O_7$ – HBr – acetic acid aqueous solutions]. *Naukovyi visnyk Chernivetskoho universytetu.: Khimiia.* [*Scientific Bulletin of Chernivtsi University: Chemistry*], 805, 46–52 [in Ukrainian].

Chayka, M.V., Tomashyk, Z.F., Tomashyk, V.M., Malanych, G.P., & Korchovyi, A.A. (2019). Optimization of bromine-emerging etching compositions $K_2Cr_2O_7$ – HBr – ethylene glycol for forming a polished surface of CdTe, $Zn_xCd_{1-x}Te$ and $Cd_xHg_{1-x}Te$. *Functional Materials,* 26 (1), 189–196. https://doi.org/10.15407/fm26.01.189 [in English].

Chayka, M.V., Tomashyk, Z.F., Tomashyk, V.M., Malanych, G.P. & Korchovyi, A.A. (2019). Chemical-mechanical polishing of CdTe, $Zn_xCd_{1-x}Te$ and $Cd_xHg_{1-x}Te$ single crystal surfaces by

$K_2Cr_2O_7$ – HBr – solvent etchants. *Functional Materials,* 26 (2), 412–418. https://doi.org/10.15407/fm26.02.412 [in English].

Chayka, M.V., Tomashyk, Z.F., Tomashyk, V.M., Malanych, G.P. & Korchovyi, A.A. (2022). Peculiarities of nanosized relief formation. on the $Cd_xHg_{1-x}Te$ single crystals surface using $K_2Cr_2O_7$ – HBr – solvent etchants. *Functional Materials*, 29 (2), 305–313. https://doi.org/10.15407/fm29.02.305 [in English].

Chayka, M., Tomashyk, Z., Tomashyk, V., Malanych, G. & Korchovyi, A. (2022). Formation of nanosized relief on the CdTe single crystals surface by bromine-emerging etchants. *Applied Nanoscience*, 12 (3), 603–609. https://doi.org/10.1007/s13204-021-01716-8 [in English].

Crocco, J., Zheng, Q., Bensalah, H. & Dieguez, E. (2012). Detector surface preparation of $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$ for electrode patterning. *Applied Surface Science,* 258, 2948–2952. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.11.014 [in English].

Denysyuk, R.O. (2014). Chemical treatment of $Cd_{1-x}Mn_xTe$ single crystals with H_2O_2 – HI – citric acid aqueous solutions. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 17 (1), 21–24 [in English].

Denysyuk, R.O., Tomashik, V.M., Tomashik, Z.F., Chernyuk, O.S. & Grytsiv, V.I. (2009). Chemical treatment of monocrystalline cadmium telluride and $Cd_{1-x}Mn_xTe$ solid solutions by H_2O_2 – HI – citratic acid etchant compositions. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics,* 12 (2), 125–128 [in English].

Dremlyuzhenko, S.G., Zakharuk, Z.I., Savchuk, A.I., & Fochuk, P.M. (2007). Effect of treatment on the CdTe, $Cd_{1-x}Mn_xTe$ and $Cd_{1-x}Zn_xTe$ surface stoichiometry. *Physica Status Solidi. B, Basic Research*, 244 (5), 1650–1654. https://doi.org/10.1002/pssb.200675124 [in English].

Hvozdiyevskyi, Ye.Ye., Denysyuk, R.O., Tomashyk, V.M., Malanych, G.P. & Tomashyk, Z.F. (2018). Interaction of HNO_3 – HI – citric acid aqueous solutions with CdTe, $Zn_{0.04}Cd_{0.96}Te$, $Zn_{0.1}Cd_{0.9}Te$ and $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$ semiconductors. *Functional Materials*, 25 (3), 471–476. https://doi.org/10.15407/fm25.03.471 [in English].

Malanych, G., Tomashyk, V., Korchovyi, A., & Sabov, T. (2023). Chemical interaction of the GaAs, GaSb, InAs, and InSb single crystals surface with I_2 + DMF (methanol) etchants. *Applied Nanoscience (Switzerland)*, 13 (10), 7047–7056. https://doi.org/10.1007/s13204-023-02870-x [in English].

Nelson, A.J., Conway, A.M., Reinhardt, C.E., Ferreira, J.L., Nikolic, R.J. & Payne, S.A. (2009). X-ray photoemission analysis of passivated $Cd_{(1-x)}Zn_xTe$ surfaces for improved radiation detectors. *Materials Letters*, 63, 180-181. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.09.051 [in English].

Отримано: 04.11.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

УДК 54-71:544.72:544.77
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.6

СОРБЦІЙНЕ ВИЛУЧЕННЯ ІОННИХ ФОРМ КУПРУМУ(II) З ВОДНИХ РОЗЧИНІВ МАГНІТОЧУТЛИВИМ НАНОКОМПОЗИТОМ З ГІДРОКСИАПАТИТНОЮ ПОВЕРХНЕЮ

О. М. Камінський[1], Р. О. Денисюк[2], М. В. Чайка[3], С. В. Писаренко[4], Д. Ю. Панасюк[5], С. В. Авдєєв[6], О. С. Євдоченко[7]

У роботі синтезовано нанорозмірний магнетит методом Елмора та досліджено його структуру набором фізико-хімічних методів. Визначено, що середній розмір кристалітів становить 3–23 нм, частинки сферичної форми, що здатні до агрегації.
Виконано модифікування поверхні магнетиту нанорозмірним гідроксиапатитом золь-гель методом та проведено порівняльний аналіз сорбційної активності утвореного нанокомпозиту. Встановлено, що при pH = 7,5 ступінь вилучення іонних форм Купруму(II) для Fe_3O_4 становить 64,7%, а для Fe_3O_4/ГА 87,5% відповідно. Найкраще сорбція іонних форм Купруму(II) відбувається у діапазоні pH 6,5–8,5. Визначено, що за перші 30 хвилин від початку контакту вилучається

[1] кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: alexkamin@ukr.net
ORCID: 0000-0003-1971-8437
[2] кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: denisuknet@ukr.net
ORCID: 0000-0003-3077-3795
[3] кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: laridae92@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5356-9856
[4] доктор філософії з галузі знань Хімічна та біоінженерія,
асистент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: snezhunka1107@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5978-487X
[5] заступник завідувача відділу досліджень матеріалів, речовин і виробів,
завідувач сектору фізико-хімічних досліджень
(Житомирський НДЕКЦ МВС України, м. Житомир);
асистент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: dima.panasuk261195@gmail.com
ORCID: 0009-0005-9490-1823

понад 50% іонних форм Купруму(II) з розчину обома поверхнями, а максимального значення досягає після 60 хвилин від початку контакту. Сорбційна рівновага настає через 75 хвилин контакту сорбат-сорбент. Встановлено, що кінетичні залежності адекватно описуються моделлю псевдо-другого порядку. Показано, що характер кривих ізотерм нагадує криві ізотерми Ленгмюра (L2 – тип) відповідно до класифікації *Гільса з виходом на насичення. Сорбційна ємність становить 21,6 та 29,2 мг/г для Fe_3O_4 та Fe_3O_4/ГА відповідно. Визначено, що для обох поверхонь ізотерма сорбції іонних форм Купруму(II) описується моделлю Ленгмюра. Це означає, що сорбція іонних форм відбувається на гомогенних (однорідних) центрах поверхні, де всі активні центри є енергетично однорідними і на поверхні може утворюватись лише мономолекулярний шар сорбату. На основі термодинамічних розрахунків енергій Гіббса процесу сорбції за стандартних умов визначено, що сорбція іонних форм Купруму(II) з водних розчинів обома поверхнями має спонтанний характер, а величина теплоти сорбції вказує на чисто фізичну сорбцію іонних форм з розчинів поверхнями Fe_3O_4 та Fe_3O_4/ГА. Показано перспективність нанокомпозиту Fe_3O_4/ГА у якості сорбента іонних форм Купруму(II).*

Ключові слова: *магнетит, гідроксиапатит, іонні форми Купруму(II), сорбція іонів, кінетика сорбції, ізотерми сорбції, хімія поверхні, колоїдна хімія.*

SORPTIVE EXTRACTION OF IONIC FORMS OF COPPER(II) FROM AQUEOUS SOLUTIONS BY A MAGNETICALLY SENSITIVE NANOCOMPOSITE WITH A HYDROXYAPATITE SURFACE

O. M. Kaminskiy, R. O. Denysiuk, M. V. Chayka, S. V. Pysarenko, D. U. Panasiuk, S. V. Avdieiev, O. S. Yevdochenko

In the work, nanosized magnetite was synthesized by the Elmore method and its structure was investigated by a set of physicochemical methods. It was determined that the average size of the crystallites is 3–23 nm, the particles are spherical and capable of aggregation. Modification of the magnetite surface with nanosized hydroxyapatite using the sol-gel method was carried out, and a comparative analysis of the sorption activity of the resulting nanocomposite was carried out. It was found that at pH = 7.5, the degree of extraction of ionic forms of Copper(II) for Fe_3O_4 is 64.7%, and for Fe_3O_4/HA 87.5%, respectively. The best sorption of ionic forms of Copper(II) occurs in the pH range of 6.5–8.5. It was determined that in the first 30 minutes from the beginning of contact, more than 50% of the ionic forms of Copper(II) are removed from the solution by both surfaces, and the maximum value is reached after 60 minutes from the beginning of contact. Sorption equilibrium occurs after 75 minutes of sorbate-sorbent contact. It was established that the kinetic dependences are adequately described by the pseudo-second-order model. It is shown that the nature of the isotherm curves resembles the Langmuir isotherm curves (L2 – type) according to the Giles classification with saturation. The sorption capacity is 21.6 and 29.2 mg/g for Fe_3O_4 and Fe_3O_4/HA, respectively. It was determined that for both surfaces the sorption isotherm of the ionic forms of Copper(II) is described by the Langmuir model. This means that the sorption of ionic forms occurs on homogeneous (homogeneous) centers of the surface, where all active centers are energetically homogeneous and only a monomolecular layer of sorbate can form on the surface. Based on thermodynamic calculations of the Gibbs energies of the sorption process under standard conditions, it was determined that the sorption of ionic forms of Copper(II) from aqueous solutions by both surfaces is spontaneous, and the value of the heat of sorption indicates a purely physical sorption of ionic forms from solutions by Fe_3O_4 and Fe_3O_4/HA surfaces. The perspective of the Fe_3O_4/HA nanocomposite as a sorbent of ionic forms of Copper(II) is shown.

Key words: *magnetite, hydroxyapatite, ionic forms of copper(II), ion sorption, sorption kinetics, sorption isotherms, surface chemistry, colloidal chemistry.*

[6] старший викладач кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: Avdieiev-S@zu.edu.ua
ORCID: 0009-0001-0340-3150
[7] доктор філософії з галузі знань 01 Освіта/Педагогіка,
доцент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: evdochenko_lena@ukr.net
ORCID: 0000-0001-6338-5372

Вступ

Військові дії на території України, а також глобальна екологічна криза в цілому суттєво погіршують стан навколишніх ґрунтів та водойм, шляхом потрапляння до об'єктів навколишнього середовища забруднювачів військового походження. Тому глобальна проблема якості питної води залишається досить актуальною, оскільки техногенні, антропогенні та військові забруднювачі першочергово впливають на природні водойми. До цього часу в Україні діє стандарт якості питної води (ДСТУ 7525:2014 Вода питна.., 2014), в якому визначено основні нормативні показники забруднювачів води різного походження, в тому числі, іонів важких металів. Також варто відмітити, що відповідно до Угоди про асоціацію з ЄС та затвердженій Директиві ЄС (Directive ..., 2020 (EU) 2020/2184, 2020) воду визнано головним харчовим продуктом, тому пошук ефективних методів очистки води до якості питної залишається актуальною задачею.

Одними із досить поширених забруднювачів природних водойм є іони Купруму(II), які належать до стійких та токсичних неорганічних природних іонів. Сама мідь знаходить широке застосування ще з давніх часів. На сьогодні цей метал широко використовується для виготовлення різноманітних провідників, сплавів (латуні, бронзи, монетні сплави), барвників, побутового посуду, матеріалів для сільськогосподарської хімії тощо. Окрім всього іншого, цей метал входить до складу бойових патронів, капсулів-детонаторів та іншого.

Живі організми можуть отримувати іони Купруму(II) через дихання, питну воду та їжу. У низьких концентраціях іони Cu^{2+} є важливим мікроелементом для людей, тварин і рослин. У людей вони відіграють важливу роль у формуванні еритроцитів і підтримці нервової системи та імунних функцій, впливають на розвиток мозку. Однак надлишкові кількості іонів Cu(II) можуть викликати гіпоглікемію, пошкодження нирок, центральної нервової системи, прискорене серцебиття, нудоту, сильні головні болі, поширене пошкодження капілярів і випадання волосся (Al-Saydeh et al., 2017; Kumar et al., 2023). Також природними джерелами іонів Купруму(II) для організмів можуть виступати молюски, печінка, гриби, горіхи та шоколад. За даними ВООЗ, вміст іонів Cu(II) у природній воді не повинен перевищувати 5 мг/л. Тому актуальним залишається питанням ефективного способу вилучення цього іона зі стічних вод (Bazargan-Lari et al., 2014).

Серед найбільш ефективних методів вилучення іонів Купруму (II) з водних розчинів є сорбція поверхнями пористих матеріалів, що мають різну хімічну природу. Досить ефективними є сорбенти, що окрім добре розвиненої поверхні володіють також магнітними властивостями, що технологічно покращує як процеси сорбції, так і ефективне вилучення матеріалу після закінчення процесу. Серед матеріалів, які використовуються для вилучення іонів важких металів, фармацевтичних та онкологічних препаратів з розчинів, є магнетит та композити на їх основі. Модифікування поверхні також сприяє покращенню ефективності сорбції (Камінський та ін., 2013; Petranovska at al., 2015; Абрамов та ін., 2017).

Так, у роботі авторами (Chaabane at al., 2020) проведено синтез листів оксиду графену (GO), які модифіковано наночастинками магнетиту (Fe_3O_4). Одержаний нанокомпозит використано для вилучення іонів Cu(II) із водних розчинів. Адсорбційну активність магнітних матеріалів на основі GO щодо іонів Cu(II) із водних розчинів вивчено в залежності від pH середовища та часу контакту адсорбат-адсорбент. Виявлено, що магнітний адсорбент на основі GO можна швидко відокремити від водного розчину за допомогою зовнішнього магнітного поля. Рівноважне значення адсорбційної ємності становило 3,808 ± 0,125 ммоль/г в нейтральному середовищі. Окрім того, відновлений матеріал на основі Cu(II) використано у якості каталізатора для гомосполучення серії алкінів.

У дослідженні (Kumar et al., 2023) авторами синтезовано біовугілля шляхом поляризації біомаси *Ascophyllum nodosum* (морських водоростей), що модифіковано наночастинками Fe_3O_4. Методами SEM, EDX, XRD, BET та FT-IR спектроскопії охарактеризовано одержаний нанокомпозит на основі біовугілля. Виявлено, що на відміну від звичайного, магнетитове біовугілля показало значно краще вилучення Cu(II) із водного розчину при pH 5. Ступінь вилучення іонів з розчину становить 75,2% (36,99 мг/г) і 90,27% (45,13 мг/г) немагнітного та магнітного біовугілля відповідно. Визначено, що процес адсорбції описується моделлю Ленгмюра, а максимальна адсорбційна ємність для магнітного біовугілля становить 53,19 мг/г. За допомогою кінетичних розрахунків показано, що хемосорбція

магнітного біовугілля домінує над фізичною адсорбцією. Показана перспективність використання магнітного біовугілля у якості альтернативного біоресурсу для видалення іонів важких металів зі стічних вод, а повторне використання дозволить зменшити загальну вартість процесу вилучення іонів.

Авторами (Shahrashoub & Bakhtiari, 2021) одержано магнітні нанокомпозити на основі порошкоподібного активованого вугілля (PAC) і гранульованого активованого вугілля (GAC). У якості магнітних наночастинок «зеленим» синтезом одержано магнетит (Fe_3O_4) із заліза, яке вилучено з шламу прямого відновлення заліза (DRI). Адсорбенти ідентифіковано за допомогою XRD, FESEM, EDX, FTIR, VSM та BET – методів. Вилучення іонів Купруму(II) з водного середовища проведено у діапазоні концентрацій 0–400 мг/л. Десорбцію виконано для концентрацій 100 і 300 мг/л протягом 10-денного циклу. Показано, що моделі Ленгмюра та Фрейндліха добре описують процеси адсорбції іонів Купруму(II). Встановлено, що максимальна адсорбційна ємність становить 23,61 і 13,37 мг/г для порошкоподібного композиту наночастинок активованого вугілля та магнетиту (MNP-PAC) і гранульованого композиту наночастинок активованого вугілля та магнетиту (MNP-GAC) відповідно. На основі результатів десорбції показано, що вилучення іонів Купруму(II) з поверхні адсорбентів було дуже низьким і з часом воно зменшувалося.

Також серед ефективних модифікаторів, які використовуються для покращення тих чи інших властивостей магніточутливого носія, використовують гідроксиапатит. Як вже зазначалось у попередніх публікаціях, гідроксиапатит – це біла кристалічна речовина складу $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$, у якій мольне співвідношення між Ca / P знаходиться в межах 1,7 : 1,5 або не перевищує 1,67 (Petranovska et al., 2015; Szcze & Chibowski, 2017; Камінський та ін., 2023). Однією з важливих властивостей гідроксиапатиту є те, що він здатний утворювати різнозаміщені ізоморфні структури у процесі сорбції катіонних та аніонних форм іонів з розчинів (Pai et al., 2020), ось тому даний матеріал набув широкого використання.

Вилучення іонів Cu(II) та Zn(II) з водних розчинів за допомогою композиту хітозан/гідроксиапатит/наномагнетит показано у (Pooladi & Bazargan-Lari, 2020). Хітозан і гідроксиапатит одержано з панцира креветок і кісткового попелу відповідно. Новосинтезований адсорбент охарактеризовано набором фізико-хімічних методів (SEM, EDAX, BET та TEM). Концентрацію іонів до та після адсорбції визначали методом полум'яної атомно-абсорбційної спектроскопії (FAAS). Ізотерми адсорбції охарактеризовано за допомогою моделей Фрейндліха, Тьомкіна та Ленгмюра. Показано, що процеси адсорбції іонів Zn^{2+} описуються моделлю Ленгмюра (R^2 = 0,987), а іонів Cu^{2+} ізотермою Тьомкіна (R^2 = 0,987). Визначено, що адсорбційна рівновага для обох іонів адекватно описується моделлю псевдо-другого порядку. Оптимальний час для ефективного вилучення іонів становив 65 хвилин.

У роботі авторами (Butrin et al., 2024) синтезовано композит гідроксиапатит/активоване вугілля (HAP/AC) з метою адсорбційного вилучення іонів Cu^{2+} з водних розчинів. Встановлено, що площа поверхні, середній розмір пор і об'єм пор HAP/AC становили 296,41 м^2/г, 3,5929 нм і 0,1509 см^3/г відповідно. Визначено, що композит HAP/AC ефективно вилучає іони Cu^{2+} (99,68%) з розчину за початкової концентрації іонів 300 мг/л, температури процесу 50°C та pH середовища (pH = 5). За цих умов адсорбційна ємність становить 299,05 мг/г. Механізмом вилучення іонів запропоновано одночасне комплексоутворення, катіонний обмін і електростатична взаємодія. Процес адсорбції описано моделлю ізотерми Фрейндліха, що вказує на нерівномірний розподіл центрів адсорбції, що призвело до багатошарової адсорбції з різними енергіями зв'язку. Кінетика адсорбції відповідає моделі псевдо-другого порядку. Показано, що процес адсорбції є спонтанним та ендотермічним зі збільшенням частки ймовірності на межі поділу тверда речовина-рідина. Крім того, за допомогою тесту на біоактивність HAC/AC показано, що ріст новоутвореного апатиту збільшується з часом замочування, що є перспективним в ортопедичній імплантології.

Однак, процеси сорбції іонів та іонних форм Cu^{2+} з водних розчинів поверхнями Fe_3O_4 магніточутливого нанокомпозиту Fe_3O_4/ГА ще не достатньо вивчені, що і стало метою даної роботи.

Матеріал і методи

Для дослідження процесів сорбції іонних форм Купруму(II) проведено синтез нанорозмірного магнетиту золь-гель методом співосадження (Елмора) за схемою реакції (Petranovska et al., 2015; Камінський та ін., 2023):

$$Fe^{2+} + 2Fe^{3+} + 8NH_3 + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 8NH_4^+.$$

В якості вихідних матеріалів для синтезу використано $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ марки «ч.д.а.», $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ марки «ч.» та 25% водний розчин NH_3 марки «ч.д.а.».

Отриманий золь осаджували в магнітному полі, промивали дистильованою водою та висушували на повітрі протягом декількох діб. Концентрація активних –ОН груп поверхні становила 2,2 ммоль/г за питомої площі поверхні зразку $S_{пит}$ = 90 м^2/г.

Методами електронної мікроскопії та рентгенівської дифракції визначено, що частинки магнетиту кулястої форми, схильні до утворення агрегатів та характеризуються розмірами 3–23 нм, що також підтверджено розрахунками за методом Шеррера. З метою ідентифікації вихідного магнетиту проведено ІЧ-Фур'є спектроскопічні дослідження (рис. 1, «Perkin Elmer», модель 1720X).

Визначено, що при 1600–1400 см$^{-1}$ відбувається валентне коливання Fe – OH зв'язків поверхні магнетиту. Наявність цієї смуги поглинання вказує на активність поверхневих –ОН груп мікрочастинок магнетиту, оскільки зв'язки такого роду сприяють проходженню сорбції (Frolova & Hrydnieva, 2020). СП при 1050 та 1121 см$^{-1}$ належать деформаційним коливанням Fe – OH груп поверхні магнетиту. При 920–890 см$^{-1}$ виявлено коливання іону $[FeO_4]^{2-}$, що характерно для структур типу шпінелі (Chukanov & Chervonnyi, 2016), а при 500–450 см$^{-1}$ ідентифіковано валентні коливання Fe – O зв'язків кубічної структури магнетиту.

Для модифікування поверхні магнетиту гидроксиапатитом необхідну кількість вихідних компонентів розраховували таким чином, щоб молярне співвідношення Ca : P знаходилося в межах 1,7 : 1,5 (Petranovska et al., 2015; Камінський та ін., 2023). Хімізм процесу одержання гідроксиапатиту на поверхні магнетиту можна описати відповідно до рівняння реакції:

$$10Ca(NO_3)_2 + 6(NH_4)_2HPO_4 + 8NH_3 + 2H_2O \rightarrow Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 + 20NH_4NO_3$$

Водні розчини 0,1 М $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ і 0,1 М $(NH_4)_2HPO_4$ доводили до pH = 11 водним розчином амоніаку (25%) (pH середовища визначали іономіром І-160М). Наважку Fe_3O_4 поміщали в розчин $(NH_4)_2HPO_4$, до якого поступово при інтенсивному перемішуванні додавали розчин $Ca(NO_3)_2$. Реакційну суміш перемішували протягом 1 години при нагріванні на електричній плитці до 100 °С, потім залишали на 24 години.

Утворений нанокомпозит Fe_3O_4/ГА промивали дистильованою водою до нейтрального pH і відокремлювали за допомогою постійного магніту. Одержаний нанокомпозит містив активні *–ОН* групи на поверхні, концентрація яких становила 2,2 ммоль/г за питомої площі поверхні $S_{пит}$ = 110 м^2/г. За допомогою ТЕМ-мікроскопії показано, що середній розмір частинок 25–30 нм, а морфологія частинок при цьому не відрізнялась від вихідного магнетиту.

Для дослідження процесів сорбції іонних форм Купруму(II) з водних розчинів на поверхні магніточутливих нанокомпозитів

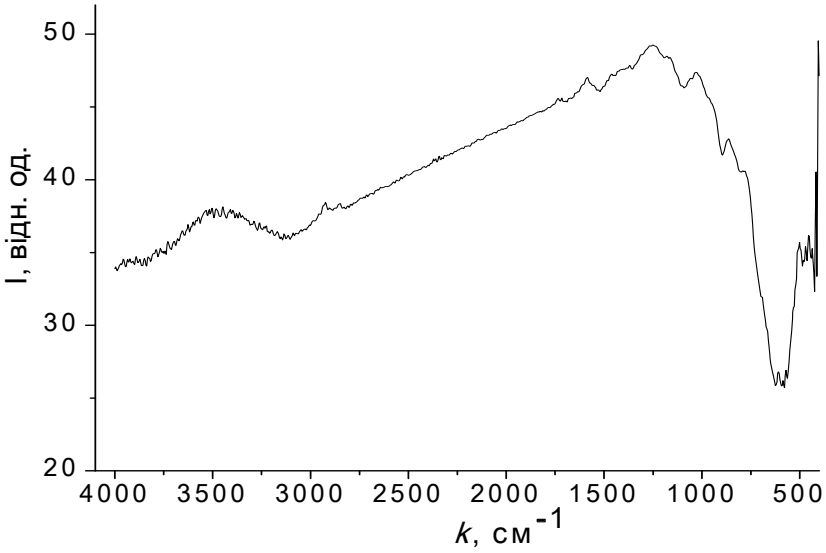


Рис. 1. ІЧ-Фур'є спектр Fe_3O_4 (Petranovska et al., 2015)

розчини іонів Cu^{2+} з концентраціями від 10–200 мг/л готували зі стандартних водних розчинів нітратних солей, використовуючи ацетатно-аміачний буфер (pH = 6,5–8,5).

Сорбцію іонних форм Цинку(II) з водних розчинів здійснювали у статичному режимі при pH = 7,0–7,5 за кімнатної температури. До 0,03 г сорбенту додавали 5 мл розчину солі відповідної концентрації і струшували протягом 3 год. на шейкері, потім розчин відділяли від сорбенту за допомогою постійного магніту. Концентрацію іонів Cu^{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 324,7 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 Купруму(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 визначення механізмів сорбції іонів одержані кінетичні криві проаналізовано відповідно до моделей псевдо-першого порядку Лагергрена (лімітуючою стадією є дифузія молекул сорбата в поверхневі шарі сорбента) та псевдо-другого порядку Хо-Маккея (лімітуючою стадією є хімічна взаємодія компонентів на межі поділу фаз).

Для обробки одержаних ізотерм сорбції іонних форм Купруму(II) з водних розчинів використано математичні моделі сорбції Ленгмюра, Фрейндліха, Тьомкіна та Дубініна-Радушкевича, формули яких зазначено в (Камінський та ін., 2023).

Результати

З метою встановлення можливих іонних форм Купруму(II) у середовищі ацетатно-аміачного буфера досліджено процеси сорбції Cu^{2+} поверхнями магнетиту та нанокомпозиту залежно від pH середовища. На рис. 2 показано залежність ступеня вилучення іонних форм Cu^{2+} від pH середовища.

Для визначення механізмів сорбції іонів одержані кінетичні криві проаналізовано відповідно до моделей псевдо-першого порядку Лагергрена (лімітуючою стадією є дифузія молекул сорбата в поверхневі шарі сорбента) та псевдо-другого порядку Хо-Маккея (лімітуючою стадією є хімічна взаємодія компонентів на межі поділу фаз).

Для обробки одержаних ізотерм сорбції іонних форм Купруму(II) з водних розчинів використано математичні моделі сорбції Ленгмюра, Фрейндліха, Тьомкіна та Дубініна-Радушкевича, формули яких зазначено в (Камінський та ін., 2023).

Результати

З метою встановлення можливих іонних форм Купруму(II) у середовищі ацетатно-аміачного буфера досліджено процеси сорбції Cu^{2+} поверхнями магнетиту та нанокомпозиту залежно від pH середовища. На рис. 2 показано залежність ступеня вилучення іонних форм Cu^{2+} від pH середовища.

Встановлено, що при pH = 7,5 ступінь вилучення іонних форм Купруму(II) для Fe_3O_4 становить 64,7%, а для Fe_3O_4/ГА – 87,5% відповідно. Найкраще сорбція іонних форм Купруму(II) відбувається у діапазоні pH 6,5–8,5.

У середовищі ацетатно – аміачного буферу при pH = 6,5–8,5 іони Cu^{2+} здатні утворювати декілька різних іонних форм Купруму(II) (Baes & Mesmer, 1976):

$$[Cu_2(CH_3COO)_2(H_2O)_2]^{2+} \leftrightarrow [Cu(NH_3)_2(H_2O)_4]^{2+} \leftrightarrow [Cu(NH_3)_4(H_2O)_2]^{2+}.$$

Для іонних форм Cu^{2+} найбільш характерне утворення аква- та амінокомплексів при чому як з координаційним числом 4, так і 6. При pH 7,5–8,5 найбільш ймовірна одночасна сорбція аквааміноплексів складу $[Cu(NH_3)_2(H_2O)_4]^{2+}$ та $[Cu(NH_3)_4(H_2O)_2]^{2+}$ поверхнями Fe_3O_4 та Fe_3O_4/ГА.

На рис. 3 показано залежність ступеня вилучення іонних форм Купруму(II) від часу контакту розчину з поверхнями сорбентів.

Визначено, що за перші 30 хвилин від початку контакту вилучається понад 50% іонних форм Купруму(II) з розчину обома поверхнями, а максимального значення досягає після 60 хвилин від початку контакту. Сорбційна рівновага настає після 75 хвилин контакту сорбат-сорбент. Максимальний ступінь вилучення іонних форм Купруму(II) для Fe_3O_4 становить 64,7%, а для Fe_3O_4/ГА – 87,5% відповідно.

Встановлено, що кінетичні залежності адекватно описуються в координатах рівняння псевдо-другого порядку (R^2 = 0,989).

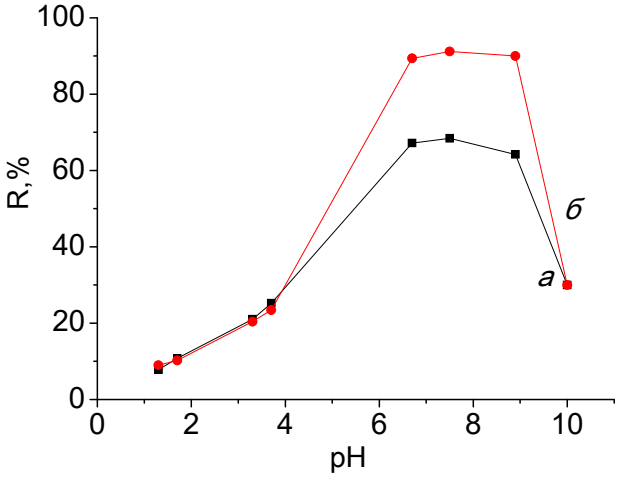


Рис. 2. Залежність ступеня вилучення іонних форм Купруму(II) від pH середовища поверхнями Fe_3O_4 (*а*) та Fe_3O_4/ГА (*б*)

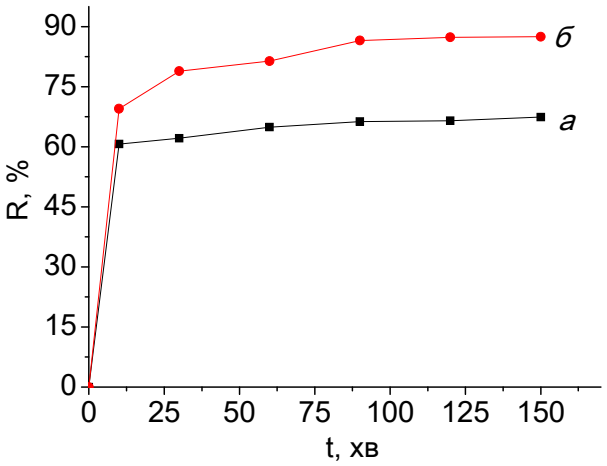


Рис. 3. Залежність ступеня вилучення іонних форм Купруму(II) від часу контакту поверхнями Fe_3O_4 (*а*) та Fe_3O_4/ГА (*б*)

Такий механізм сорбції дозволяє враховувати як взаємодії на межі поділу сорбат-сорбент, так і міжмолекулярні взаємодії сорбованих іонних форм Купруму(II) на обох магніточутливих поверхнях.

Ізотерми адсорбції іонних форм Купруму(II) з розчинів поверхнями Fe_3O_4 та Fe_3O_4/ГА показано на рис. 4.

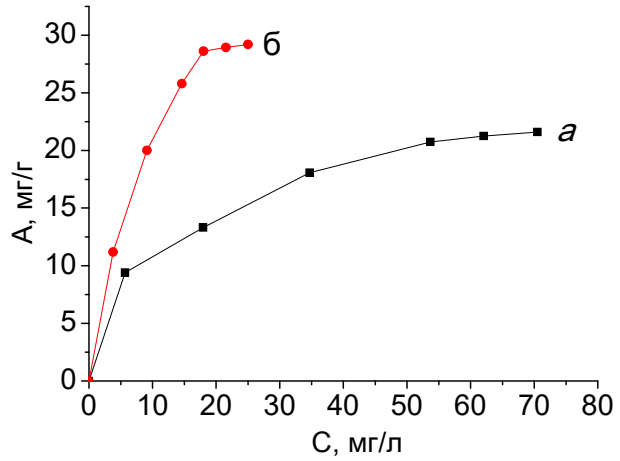


Рис. 4. Ізотерми адсорбції іонних форм Купруму(II) з розчинів поверхнями Fe_3O_4 (*а*) та Fe_3O_4/ГА (*б*)

Як видно з рисунку, характер кривих ізотерм нагадує криві ізотерми Ленгмюра (L2 – тип) відповідно до класифікації Гільса з виходом на насичення. Такий тип ізотерм вказує на те, що міжмолекулярна взаємодія сорбат-сорбент на межі поділу переважає над взаємодією сорбат-сорбат в об'ємі розчину. В таблиці 1 наведено експериментальні дані сорбції іонних форм Купруму(II) поверхнями обох сорбентів.

Як видно з таблиці 1, зростання коефіцієнту розподілу (*E, мл/г*) для нанокомпозиту Fe_3O_4/ГА, в порівнянні з немодифікованою поверхнею Fe_3O_4, у понад три рази вказує на більшу спорідненість гідроксиапатиту до іонних форм Купруму(II) на межі поділу «сорбат-сорбент».

Ізотерми сорбції проаналізовано відповідно до моделей сорбції Ленгмюра, Фрейндліха, Тьомкіна та Дубініна-Радушкевича. Визначено, що для обох поверхонь ізотерма сорбції іонних форм Купруму(II) описується моделлю Ленгмюра, в порівнянні з іншими моделями, про що свідчать коефіцієнти кореляції (R^2 = 0,991 для Fe_3O_4; R^2 = 0,984 для Fe_3O_4/ГА). Це означає, що сорбція іонних форм відбувається на гомогенних (однорідних) центрах поверхні, де всі активні центри є енергетично одно-

Таблиця 1

Експериментальні дані сорбції іонних форм Купруму(II) поверхнями Fe_3O_4 та Fe_3O_4/ГА в статичному режимі протягом 90 хвилин за 293 К

Fe_3O_4			**Fe_3O_4/ГА**		
А, мг/г	R, %	E, мл/г	А, мг/г	R, %	E, мл/г
21,6	64,7	310	29,2	87,5	1170

рідними і на поверхні може утворюватись лише мономолекулярний шар сорбату.

На основі термодинамічних розрахунків енергій Гіббса процесу сорбції за стандартних умов визначено, що сорбція іонних форм Купруму(II) з водних розчинів обома поверхнями має спонтанний характер, а величина теплоти сорбції вказує на чисто фізичну сорбцію іонних форм з розчинів поверхнями Fe_3O_4 та Fe_3O_4/ГА.

Висновки

У роботі синтезовано нанорозмірний магнетит методом Елмора. Показано, що одержаний магнетит характеризується хорошими магнітними характеристиками та може бути використаний у якості магніточутливого носія для дослідження процесів сорбції іонних форм важких металів з водних розчинів. Методами електронної мікроскопії та рентгенівської дифракції визначено, що частинки магнетиту кулястої форми, схильні до утворення агрегатів та характеризуються розмірами 3–23 нм, що також підтверджено розрахунками за методом Шеррера. Структуру вихідного магнетиту підтверджено ІЧ-Фур'є спектроскопічними дослідженнями. Встановлено наявність на поверхні активних –ОН груп.

Здійснено модифікування поверхні магнетиту нанорозмірним гідроксиапатитом золь-гель методом та проведено порівняльний аналіз сорбційної активності утвореного нанокомпозиту.

Встановлено, що при pH = 7,5 ступінь вилучення іонних форм Купруму(II) для Fe_3O_4 становить 64,7%, а для Fe_3O_4/ГА – 87,5%. Найкраще сорбція іонних форм Купруму(II) відбувається у діапазоні pH: 6,5–8,5.

Визначено, що за перші 30 хвилин від початку контакту вилучається понад 50% іонних форм Купруму(II) з розчину обома поверхнями, а максимального значення вилучення досягає після 60 хвилин від початку контакту. Сорбційна рівновага настає після 75 хвилин контакту сорбат-сорбент. Встановлено, що кінетичні залежності адекватно описуються моделлю псевдо-другого порядку.

Показано, що характер кривих ізотерм нагадує криві ізотерми Ленгмюра (*L2 – тип*) відповідно до класифікації Гільса з виходом на насичення. Сорбційна ємність становить 21,6 та 29,2 мг/г для Fe_3O_4 та Fe_3O_4/ГА відповідно. Визначено, що для обох поверхонь ізотерма сорбції іонних форм Купруму(II) описується моделлю Ленгмюра. Це означає, що сорбція іонних форм відбувається на гомогенних (однорідних) центрах поверхні, де всі активні центри є енергетично однорідними і на поверхні може утворюватись лише мономолекулярний шар сорбату.

На основі термодинамічних розрахунків енергій Гіббса процесу сорбції за стандартних умов визначено, що сорбція іонних форм Купруму(II) з водних розчинів обома поверхнями має спонтанний характер, а величина теплоти сорбції вказує на чисто фізичну сорбцію іонних форм з розчинів поверхнями Fe_3O_4 та Fe_3O_4/ГА.

Список використаної літератури

Абрамов М.В., Кусяк А.П., Камінський О.М., Туранська С.П., Петрановська А.Л., Кусяк Н.В., Туров В.В., Горбик П.П. Синтез та властивості магніточутливих поліфункціональних нанокомпозитів для застосування в онкології. *Поверхня.* 2017. № 9 (24). С. 165–198. [Електронний ресурс]. URL: http://eprints.zu.edu.ua/id/eprint/27170 (дата звернення 20.09.2024).

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 10.10.2024).

Камінський О.М., Денисюк Р.О., Чайка М.В., Писаренко С.В., Панасюк Д.Ю. Сорбція йонних форм Цинку(II) з водних розчинів поверхнями магніточутливих нанокомпозитів, модифікованих гідроксиапатитом. *Український журнал природничих наук.* 2023. № 5. С. 70–79. https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.8.

Камінський О.М., Кусяк Н.В., Петрановська А.Л., Абрамов М.В., Туранська С.П., Горбик П.П., Чехун В.Ф. Адсорбція комплексів *цис*-дихлордіамінплатини наноструктурами на основі магнетиту. *Металофізика та новітні технології.* 2013. Т. 35. № 3. С. 389–406. [Електронний ресурс]. URL: http://eprints.zu.edu.ua/id/eprint/17677 (дата звернення 15.09.2024).

Al-Saydeh S.A., El-Naas M.H., Zaidi S.J. Copper removal from industrial wastewater: A comprehensive review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry.* 2017. Vol. 56. P. 35–44. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.07.026.

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

Bazargan-Lari R., Zafarani H.R., Bahrololoom M.E., Nemati A. Removal of Cu(II) ions from aqueous solutions by low-cost natural hydroxyapatite/chitosan composite: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers.* 2014. Vol. 45. № 4. P. 1642–1648. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2013.11.009.

Butrin N., Rueangchai N., Noisong P., Sansuk S. Synthesis of hydroxyapatite/activated carbon composite with bioactivity property and copper ion removal efficiency. *Materials Today Communications.* 2024. Vol. 40. 109615 p. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.109615.

Chaabane L., Beyou E., Luneau D., Baouab M.H.V. Functionalization of graphene oxide sheets with magnetite nanoparticles for the adsorption of copper ions and investigation of its potential catalytic activity toward the homocoupling of alkynes under green conditions. *Journal of Catalysis.* 2020. Vol. 388. P. 91–103. https://doi.org/10.1016/j.jcat.2020.04.019.

Chukanov N.V., Chervonnyi A.D. IR Spectra of Minerals and Related Compounds, and Reference Samples' Data. In: Infrared Spectroscopy of Minerals and Related Compounds. Springer Mineralogy. *Springer, Cham.* 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25349-7_2.

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 20.09.2024).

Frolova L.A., Hrydnieva T.V. Synthesis, structural, magnetic and photocatalytic properties of MFe_2O_4 (M=Co, Mn, Zn) ferrite nanoparticles obtained by plasmachemical method. *Journal of Chemistry and Technologies.* 2020. Vol. 28 (2). P. 202–210. https://dx.doi.org/10.15421/082022.

Kumar P., Kumar Patel A., Singhania R.R., Chen Ch.-W., Saratale R.G., Dong Ch.-D. Enhanced copper (II) bioremediation from wastewater using nano magnetite (Fe_3O_4) modified biochar of Ascophyllum nodosum. *Bioresource Technology.* 2023. Vol. 388. 129654 p. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129654.

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. Vol. 38. 101574 p. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101574.

Petranovska A.L., Abramov N.V., Turanska S.P., Gorbyk P.P., Kaminskiy A.N., Kusyak N.V. Adsorption of *cis*-dichlorodiammineplatinum by nanostructures based on single-domain magnetite. *Journal of Nanostructure in Chemistry.* 2015. Vol. 5. № 3. P. 275–285. https://doi.org/10.1007/s40097-015-0159-9.

Pooladi A., Bazargan-Lari R. Simultaneous removal of copper and zinc ions by Chitosan/Hydroxyapatite/nano-Magnetite composite. *Journal of Materials Research and Technology.* 2020. Vol. 9. № 6. P. 14841–14852. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.10.057.

Shahrashoub M., Bakhtiari S. The efficiency of activated carbon/magnetite nanoparticles composites in copper removal: Industrial waste recovery, green synthesis, characterization, and adsorption-desorption studies. *Microporous and Mesoporous Materials.* 2021. Vol. 311. 110692 p. https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110692.

Szcze A., Ho L., Chibowski E. Synthesis of hydroxyapatite for biomedical applications. *Advances in Colloid and Interface Science.* 2017. Vol. 249. P. 321–330. https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.04.007.

References

Abramov, M.V., Kusyak, A.P., Kamins′kyy, O.M., Turans′ka, S.P., Petranovs′ka, A.L., Kusyak, N.V., Turov, V.V., & Horbyk, P.P. (2017). Syntez ta vlastyvosti mahnitochutlyvykh polifunktsional′nykh nanokompozytiv dlya zastosuvannya v onkolohiyi [Synthesis and properties of magnetosensitive multifunctional nanocomposites for use in oncology]. *Poverkhnya [Surface],* 9 (24), 165–198. [Electronic resource]. URL: http://eprints.zu.edu.ua/id/eprint/27170 (access date 20.09.2024) [in Ukrainian].

Voda pytna. Vymohy ta metody kontrolyuvannya yakosti DSTU 7525:2014 Vydannya ofitsiyne. [Drinking water. Requirements and methods of quality control DSTU 7525:2014 Official edition] [Electronic resource]. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/1-10672-dstu_voda_pytna.pdf (access date 10.10.2024) [in Ukrainian].

Kamins′kyy, O.M., Denysyuk, R.O., Chayka, M.V., Pysarenko, S.V., & Panasyuk, D.YU. (2023). Sorbtsiya yonnykh form Tsynku(II) z vodnykh rozchyniv poverkhnyamy mahnitochutlyvykh nanokompozytiv, modyfikovanykh hidroksyapatytom [Sorption of ionic forms of Zinc(II) from aqueous solutions by the surfaces of magnetically sensitive nanocomposites modified with hydroxyapa-

tite]. *Ukrayins'kyy zhurnal pryrodnychykh nauk [Ukrainian Journal of Natural Sciences]*, 5, 70–79. https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.8 [in Ukrainian].

Kamins'kyy, O.M., Kusyak, N.V., Petranovs'ka, A.L., Abramov, M.V., Turans'ka, S.P., Horbyk, P.P., & Chekhun, V.F. (2013). Adsorbtsiya kompleksiv tsys-dykhlordiaminplatyny nanostrukturamy na osnovi mahnetytu [Adsorption of cis-dichlorodiamineplatinum complexes by magnetite-based nanostructures]. *Metalofizyka ta novitni tekhnolohii [Metalophysics and the latest technologies]*, 35 (3), 389–406. [Electronic resource]. URL: http://eprints.zu.edu.ua/id/eprint/17677 (access date 15.09.2024) [in Ukrainian].

Al-Saydeh, S.A., El-Naas, M.H., & Zaidi, S.J. (2017). Copper removal from industrial wastewater: A comprehensive review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry,* 56. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.07.026 [in English].

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

Bazargan-Lari, R., Zafarani, H.R., Bahrololoom, M.E., & Nemati, A. (2014). Removal of Cu(II) ions from aqueous solutions by low-cost natural hydroxyapatite/chitosan composite: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45 (4), 1642–1648. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2013.11.009 [in English].

Butrin, N., Rueangchai, N., Noisong, P., & Sansuk, S. (2024). Synthesis of hydroxyapatite/activated carbon composite with bioactivity property and copper ion removal efficiency. *Materials Today Communications*, 40, 109615. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.109615 [in English].

Chaabane, L., Beyou, E., Luneau, D., & Baouab, M.H.V. (2020). Functionalization of graphene oxide sheets with magnetite nanoparticles for the adsorption of copper ions and investigation of its potential catalytic activity toward the homocoupling of alkynes under green conditions. *Journal of Catalysis*, 388, 91–103. https://doi.org/10.1016/j.jcat.2020.04.019 [in English].

Chukanov, N.V., & Chervonnyi, A.D. (2016). IR Spectra of Minerals and Related Compounds, and Reference Samples' Data. In: Infrared Spectroscopy of Minerals and Related Compounds. *Springer Mineralogy. Springer, Cham.* https://doi.org/10.1007/978-3-319-25349-7_2 [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 20.09.2024). [in English].

Frolova, L.A., & Hrydnieva, T.V. (2020). Synthesis, structural, magnetic and photocatalytic properties of MFe_2O_4 (M=Co, Mn, Zn) ferrite nanoparticles obtained by plasmachemical method. *Journal of Chemistry and Technologies*, 28 (2), 202–210. https://dx.doi.org/10.15421/082022 [in English].

Kumar, P., Kumar Patel, A., Singhania, R.R., Chen, Ch.-W., Saratale, R.G., & Dong, Ch.D. (2023). Enhanced copper (II) bioremediation from wastewater using nano magnetite (Fe_3O_4) modified biochar of Ascophyllum nodosum. *Bioresource Technology*, 388, 129654. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129654 [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 *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 5 (3), 275–285. https://doi.org/10.1007/s40097-015-0159-9 [in English].

Pooladi, A., & Bazargan-Lari, R. (2020). Simultaneous removal of copper and zinc ions by Chitosan/Hydroxyapatite/nano-Magnetite composite. *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (6), 14841–14852. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.10.057 [in English].

Shahrashoub, M., & Bakhtiari, S. (2021). The efficiency of activated carbon/magnetite nanoparticles composites in copper removal: Industrial waste recovery, green synthesis, characterization, and adsorption-desorption studies. *Microporous and Mesoporous Materials*, 311, 110692. https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110692 [in English].

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

Отримано: 04.11.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

УДК 541.64
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.7

ВПЛИВ МІНЕРАЛЬНОГО НАПОВНЮВАЧА СИЛІЦІЙ(IV) ОКСИДУ, МОДИФІКОВАНОГО НЕОРГАНІЧНИМИ СПОЛУКАМИ НА ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЇХ КОМПОЗИТІВ З ПОЛІАНІЛІНОМ

Г. В. Мартинюк[1], О. І. Аксіментьєва[2]

Вивчено фізико-хімічні закономірності формування і синтезовано методом полімеризації in situ зразки поліфункціональних органо-неорганічних нанокомпозитів на основі полімерної матриці – спряженого поліаміноарену (поліаніліну) і наночастинок SiO_2, (марка АЕ-300) модифікованих сполуками титан(IV) оксиду (марка ТАС-7) і фосфор(III) хлориду (Ф-2.1).
З'ясовано, що використання модифікованих неорганічними сполуками наночастинок силіцій(IV) оксиду у складі органо-неорганічних нанокомпозицій на основі поліаніліну може не тільки змінити їх структуру, але й спричинити покращення їх фізико-хімічних характеристик.
Методом оптичної мікроскопії (мікроскоп «Micromed» з цифровою фотокамерою «Nicon-2500»), досліджено особливості морфологічної будови дисперсії модифікованого силіцій(IV) оксиду та композиту ПАн/HCl- SiO_2. Питому електропровідність досліджуваних композитів у пресованих зразках визначали за стандартним 2-х контактним методом при температурі T = 293 K, а також встановлено зв'язок електричних властивостей зі структурою композитів.
Встановлено оптимальний склад модифікованих неорганічними сполуками нанокластерів SiO_2 (1–4 % мас.) для отримання нанокомпозитів з прогнозованими електричними властивостями.
Показано, що при вмісті силіцій(IV) оксиду в межах 1–4 мас. % відбувається збільшення питомої електропровідності композитів, при цьому введення модифікованих наночастинок SiO_2 сприяє стабілізації питомого опору поліаніліну
Підвищення електропровідності поліаніліну за наявності модифікованого неорганічними сполуками силіцій(IV) оксиду може бути зумовлено процесами структурування колоїдної дисперсії SiO_2 з утворенням просторової трьохмірної сітки, в яку включаються ланцюги електропровідного полімеру.

Ключові слова: *органо-неорганічні нанокомпозити, нанокластери, полімеризація in situ, наночастинки силіцій(IV) оксиду, фізико-хімічні характеристики.*

[1] доктор хімічних наук, доцент,
професор кафедри природничих наук
(Рівненський державний гуманітарний університет, м. Рівне)
e-mail: galmart@ukr.net
ORCID: 0000-0001-6842-5601
[2] доктор хімічних наук, професор,
професор кафедри фізичної та колоїдної хімії
(Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів)
e-mail: aksimen@ukr.net
ORCID: 0000-0003-3836-9607

EFFECT OF MINERAL FILLER SILICA (IV) OXIDE MODIFIED WITH INORGANIC COMPOUNDS ON THE ELECTRICAL PROPERTIES OF THEIR COMPOSITES WITH POLYANILINE

G. V. Martyniuk, O. I. Aksimentyeva

The physico-chemical laws of formation were studied and samples of multifunctional organic-inorganic nanocomposites based on a polymer matrix – conjugated polyaminoarene (polyaniline) and SiO_2 (brand AE-300) nanoparticles modified with compounds of titanium(IV) oxide (brand TAS-7) and phosphorus(III) chloride(brand F-2.1) were synthesized by the in situ polymerization method.
It was found that the use of silicon(IV) oxide nanoparticles modified by inorganic compounds in the composition of of organic-inorganic nanocomposites based on polyaniline can not only change their structure, but also cause an improvement in their physico-chemical characteristics.
The peculiarities of the morphological structure of the dispersion of modified silicon(IV) oxide and PANi/HCl-SiO_2 composite were investigated using the method of optical microscopy («Micromed» microscope with a digital camera «Nicon-2500»). The specific electrical conductivity of the studied composites in pressed samples was determined according to the standard 2-x by the contact method at a temperature of T = 293 K, and the relationship between the electrical properties and the structure of the composites was established.
The optimal composition of SiO_2 nanoclusters modified with inorganic compounds (1−4% by mass) for obtaining nanocomposites with predicted electrical properties was established.
It is shown that the silica content of 1–4% causes an increasing of composite conductivity; moreover the introduction of silica contributes to the stabilization of the polyaniline
An increase in the electrical conductivity of polyaniline in the presence of silicon(IV) oxide modified with inorganic compounds can be due to the processes of structuring the SiO_2 colloidal dispersion with the formation of a spatial three-dimensional network, which includes the chains of the conductive polymer.

Key words: *organic-inorganic nanocomposites, nanoclusters, in situ polymerization, silicon(IV) oxide nanoparticles, physical and chemical characteristics.*

Вступ

Стрімкий розвиток науки і техніки призвів до появи «інтелектуальних», або «розумних», полімерних матеріалів, які, завдяки багатофункціональним властивостям, простоті обробки чутливості до зовнішніх впливів, є надзвичайно перспективними для сучасних технологій (Мартинюк, 2024).

Важливого значення набувають розробка та дослідження нових високодисперсних композиційних матеріалів на основі полімерів, легованих або наповнених органічними і неорганічними компонентами, зокрема, сполуками перехідних металів або їх оксидами (Опайнич та ін., 2012; Ilhan-Ayisigi & Yesil-Celiktas, 2018; Aksimentyeva et al., 2020a; Aksimentyeva et al., 2020b).

Тому серед полімерних композитів, особливо в останні роки, великого значення набули наногібридні полімер-неорганічні композити (Park et al., 2013), тобто гібридні органо-неорганічні нанокомпозитні структури на основі електропровідних полімерів та напівпровідникових мінеральних наповнювачів оксидного типу, а саме нанокластери кремнеземів або силіцій-оксидні матеріалів (Філоненко і Лобанов, 2010; Аксіментьєва та ін., 2017).

Введення нанорозмірних наповнювачів до складу композитів з електропровідними полімерами дає змогу керувати електричними властивостями цих полімерів, їх сенсорною чутливістю та іншими фізико-хімічними характеристиками (Liberman et al., 2014; Meer et al., 2015).

Матеріал і методи

Досліджено вплив наночастинок силіцій(IV) оксиду, модифікованих неорганічними сполуками на електричні властивості (питомий опір та провідність, активаційні параметри провідності їх композитів з поліаніліном (ПАн)) з метою створення нових наноматеріалів з прогнозованими характеристиками.

Для вивчення електричних властивостей композитів на основі ПАну з силіцій(IV) оксидом було використано аеросил − 300, модифікований титан(IV) оксидом (марка ТАС-7) та фосфор(III) хлоридом (марка Ф-2.1) (Li et al., 2005; Bogatyrev et al., 2010; Аксіментьєва та ін., 2015; Bapat et al., 2016).

Аналогічно до композитів, наповнених полімерними наповнювачами, методом окисної полімеризації *in situ* було сформовано гібридні композити поліаніліну з немодифікованими та модифікованими наночастинками силіцій(IV) оксиду (рис. 1)

(Остапович і Семенюк, 2008; Paul & Robeson, 2008; Liu, 2008; Аксіментьєва та ін., 2015).

Результати та їх обговорення

Морфологічну структуру утвореної полімерної дисперсії силіцій(IV) оксиду в хлоридній кислоті та композиту ПАн–ТАС-7 досліджено методом оптичної мікроскопії (мікроскоп «Micromed» з цифровою фотокамерою «Nicon-2500»). Модифікована оксидом титану(IV) дисперсія SiO_2 осаджена на тверду поверхню, має вигляд рівномірного щільного покриття (рис. 1, а) без окремих структурних утворень. А при формуванні органо-неорганічного композиту ПАн–SiO_2 утворюється переважно глобулярна структура, в якій частинки силіцій(IV) оксиду ніби обгорнуті полімерною оболонкою ПАн (рис. 1, б) (Аксіментьєва та ін., 2015). Сформований композитний матеріал має темно-зелене забарвлення, властиве для легованої хлоридною кислотою емераральдинової солі ПАн (Liu, 2008).

Отримані результати добре узгоджуються з даними спектрального аналізу, які подано в (Зарко та ін., 1988), згідно яких утворений композит ПАн–SiO_2 не є простою сумішшю ПАн з частинками нанодисперсного SiO_2. Наночастики SiO_2 виступають як ядро реакції, а взаємодія відбувається на межі поділу цих частинок і макромолекули поліаніліну.

Для вивчення впливу мінерального наповнювача на електричні властивості утворених композитів було синтезовано зразки кремнезему, з різним умістом SiO_2 з модифікованою та немодифікованою поверхнею.

Авторами (Bogatyrev et al., 1984; Li et al., 2005) було запропоновано механізм взаємодії пари фосфор(III) хлориду з пірогенною формою дисперсного кремнезему – аеросилом в інтервалі температур 200–300^{0}C за умови, коли на поверхні SiO_2 присутні різні форми сорбованої води. Гідратована поверхня SiO_2 передбачає координаційне насичення атома Силіцію за рахунок утворення донорно-акцепторного зв'язку з Оксигеном міцно сорбованими молекулами води. В такому положенні сорбована вода може перешкоджати перебігу реакції згідно механізму SN_I–Si з утворенням хлорсилильних груп і процес взаємодії повинен зміститися в сторону утворення групи Si–O–P (Bogatyrev et al., 1984).

Отримані результати дають можливість описувати процес взаємодії фосфор(III) хлориду з гідратованим дисперсним SiO_2 наступним чином: присутність на кремнеземі деякої кількості води, яка координована атомом Силіцію, зміщує процес взаємодії в сторону утворення зв'язків Si–O–P з одночасним прискоренням даного процесу. Деяка кількість води може взаємодіяти з частиною груп P–Cl, утворюючи похідні фосфористої кислоти в гідрофосфорильній формі. Подальший процес гідролізу додатковою кількістю води повністю руйнує всі звязки, що залишилися. Процеси, які відбуваються можна представити у вигляді схеми 1 (Bogatyrev et al., 1984).

Фосфорилювання поверхні SiO_2 та утворення хлорсиланольних груп можливо відбувається в результаті перебігу двох паралельних реакцій – нуклеофільне заміщення водню силанольної групи атомом Фосфору (*1*) та електрофільне заміщення гідроксилу силанольної групи атомом Хлору (*2*). В результаті внутрімолекулярного перегрупування (*3*) утворюється сполука складу O = P – Cl. Утворені продукти подано на схемі 2 (Bogatyrev et al., 1984; Мартинюк, 2024).

а

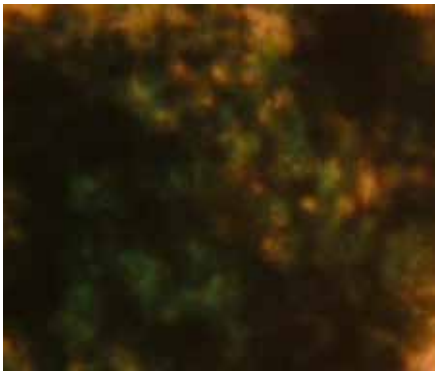

б

Рис. 1. Світлини колоїдної дисперсії модифікованого SiO_2 марки ТАС-7 (*а*) та композиту ПАн–ТАС-7 (*б*). Вміст SiO_2 – 4% (мас). Збільшення 150

Схема 1

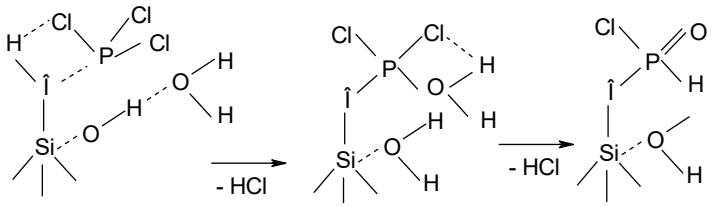
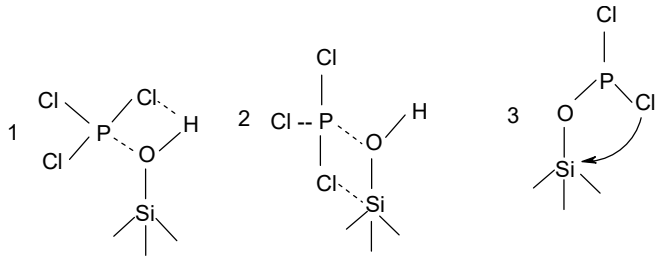


Схема 2



При вимірюванні питомого опору (ρ) при T = 293 K встановлено, що при 0,8–2,4 мас. % вмісті силіцій(IV) оксиду в композитах відбувається його зменшення, а при 2,4–4,0 мас.% – зростання порівняно з ненаповненим полімером (ПАн/HCl) (ρ = 107±2 Ом·м). Аналогічні залежності спостерігалися при використанні модифікованих форм силіцій(IV) оксиду. Залежність питомого опору від вмісту різних форм SiO2 подано в таблиці 1 (Аксіментьєва та ін., 2015).

За даними таблиці 1 встановлено, що зменшення питомого опору наповненого композиту є більш помітним порівняно з ненаповненим. Так, при 2,4% (мас.) наповнені для композиту ПАн/HCl–SiO_2 опір зменшується у 4 рази, для ПАн/HCl–SiO_2–TiO_2 – у 6 разів і близько 47 разів для ПАн/HCl–SiO_2–PCl_3. Результати визначень наведено в таблиці 2.

Можна припустити, що суттєвий вплив наповнювача кремнезему модифікованих титан(IV) оксидом та фосфор(III) хлоридом SiO_2, зумовлений їхніми електрофізичними властивостями (Zarko et al., 1983; Bogatyrev et al., 2010; Аксіментьєва та ін., 2015) і,

Таблиця 1

Електричні властивості гібридних композитів ПАн/HCl–SiO_2

Вміст SiO_2, мас. %	**Питомий опір, ρ_{293} Ом · м**		
	ПАн/HCl–SiO_2 (АЕ –300)	**ПАн/HCl–SiO_2–TiO_2 (ТАС–7)**	**ПАн/HCl–SiO_2–PCl_3 (Ф –2,1)**
0,8	58,7	39,6	14,0
2,4	25,4	17,3	2,3
3,2	34,4	23,0	5,8
4,0	41,5	29,2	9,3
10,0	$1{,}5 \cdot 10^6$	$9{,}8 \cdot 10^5$	$1{,}1 \cdot 10^5$

**Похибка 1%*

Таблиця 2

Параметри провідності гібридних композитів ПАн/HCl–SiO_2 за вмісту наповнювача 2,4% (Аксіментьєва та ін., 2015)

Зразок	**ρ_{293}, Ом·м**	**ρ_0, Ом·м**	***E*, еВ**
ПАн–HCl	107,1	9,07	0,127±0,005
ПАн–HCl–АЕ (НАЕ)	25,4	3,82	0,124±0,005
ПАн–HCl–(ТАС–7)	17,3	1,03	0,132±0,005
ПАн–HCl–(Ф–2,1)	2,3	0,29	0,107±0,004

Таблиця 3

Залежність опору композиту ПАн–HCl/SiO_2 від температури.
Вміст SiO_2 становить 0,8% мас.

T, K	296	306	316	326	336	346	356	366	376	*386*
R, кОм	0,58	0,57	0,57	0,56	0,54	0,52	0,51	0,49	0,47	0,45

**Похибка 1%*

відповідно, меншим питомим опором (ρ), порівняно з немодифікованим силіцій(IV) оксидом.

Встановлено, що отримані гібридні композити складу ПАн–HCl/SiO_2 поводять себе як типові напівпровідники, а саме – зі збільшенням температури опір зменшується (табл. 3).

На основі лінійних ділянок залежностей, представлених в координатах $ln(R/R_0) – 1/T$ було розраховано енергії активації перенесення заряду. Згідно з даними, поданими в таблиці 2, значення енергії активації перенесення заряду в композитах (ε_σ, = 0,117–0,132еВ) незначно змінюється порівняно з ненаповненою композицією ПАн–HCl (ε_σ, = 0,127±0,005 еВ).

З'ясовано, що введення наповнювача модифікованого неорганічними сполуками SiO_2 у кількості 1–4% мас. призводить до зростання електропровідності, незважаючи на високий власний питомий опір, який становить (400–1000 Ом·м), а потім – її стабілізації. Стабілізація електропровідності відбувається в результаті зв'язування надлишкової вологи, модифікованим SiO_2, завдяки гідрофільним поверхневим функціональним групам, таким як Si–OH (Zhang et al., 2006; Філоненко і Лобанов, 2010). Це, в свою чергу, виключає участь молекул води в процесах протонування емеральдинхлориду, і, відповідно, зміни електропровідності. Ймовірно, що наявність таких наповнювачів у структурі композиту з полімером ймовірно спричиняє зростання електропровідності внаслідок підвищеної адсорбції вологи (Bogatyrev & Chuiko, 1984).

З'ясовано, що модифікований неорганічними частинками силіцій(IV) оксид зумовлює зростання електропровідності композитів ПАн–HCl/SiO_2, ймовірно, за рахунок процесів структурування колоїдної дисперсії силіцій(IV) оксиду з утворенням просторової трьохмірної сітки Si–O зв'язків, утвореної SiO_4 – тетраедрами, в яку включені ланцюги електропровідного полімеру (Гончарук та ін., 2010).

Висновки

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що високодисперсні наповнювачі оксидного типу (SiO_2, NiO, TiO_2 та інші) модифіковані або немодифіковані неорганічними сполуками, введені до складу органо-неорганічних систем на основі поліаміноаренів, проявляють здатність впливати на фізико-хімічні параметри утворених композитів в результаті змін у структурі утворених композитів, тому їх можна рекомендувати як основу для створення чутливих елементів газових сенсорів для різноманітного застосування.

Список використаної літератури

Аксіментьєва О., Богатирьов В., Мартинюк Г. та ін. Синтез і електричні властивості композитів поліаніліну з наночастинками силіцій(IV) оксиду. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія Хімія.* 2015. № 22. С. 11–14.

Аксіментьєва О., Ціж Б., Чохань М. Сенсори контролю газових середовищ у харчовій промисловості та довкіллі: монограф. Львів : Піраміда. 2017. 284 с.

Гончарук О.В., Малишева М.Л., Зарко В.І., Гриценко В.Ф. Структуроутворення в дисперсіях пірогенного кремнезему в присутності неіндиферентних електролітів. *Наноструктурне матеріалознавство.* 2010. № 2. С. 16–23.

Зарко В., Козуб Г., Сивалов Е. та ін. Кислотні центри поверхні пірогенного титано-кремнезему. *Український хімічний журнал.* 1988. № 54(11). С. 1144–1146.

Мартинюк Г.В. Фізико-хімія полімер-полімерних композитів з контрольованими функціональними властивостями: дис…д-ра хім. наук: 02.00.04. Львів. 2024. 378 с.

Опайнич І.Є., Аксіментьєва О.І., Дьяконов В.П., Пєхота С., Уланський Я., Демченко П.Ю., Українець А.М. Структура і термодеформаційні властивості гібридних композитів полімер-магнетит. *Фізико-хімічна механіка матеріалів.* 2012. № 1. С. 89–94. [Електронний ресурс]. URL: http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/138407 (дата звернення 31.08.2024).

Остапович Б., Семенюк Ю. Полімеризація аніліну на поверхні дисперсного оксиду кремнію. *Вісник Львівського Університету. Сер. хім.* 2008. Вип. 49(2). С. 112–117.

Філоненко О.В., Лобанов В.В. Структура та властивості нанокластерів кремнезему (Огляд). *Фізика і хімія твердого тіла.* 2010. Т. 11. № 1. С. 138–149.

Aksimentyeva O., Martyniuk G., Horbenko Yu., Malynych S., Filipsonov R. Polymer-magnetite thermosetting composites with protective and antiradar functions. Special issue of the journal *«Physical and chemical mechanics of materials»*, L.: 2020. P. 137–140.

Aksimentyeva O.I., Chepkov I.B., Filipsonov R.V., Malynych S.Z. et al. Hybrid Composites with Low Reflection of IR Radiation. *Physics and chemistry of solid state.* 2020. Vol. 21. №. 4. P. 764–770. https://doi.org/10.15330/pcss.21.4.764-770.

Bapat G. Labade, Chaudhari A., Zinjarde S. Silica nanoparticle based techniques for extraction, detection, and degradation of pesticides. *Advances in Colloid and Interface Science.* 2016. № 237. P. 1–14. https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.06.001.

Bogatyrev V.M., Borisenko L.I., Oranskaya E.I. et al. Influence of synthesis conditions on the structural characteristics of NiO/SiO_2 oxide nanocomposites. *Surface.* 2010. Vol. 2. № 17. P. 178–189. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.06.044.

Bogatyrev V.M., Chuiko A.A. Interaction of phosphorus trichloride with dehydrated aerosil on its surface. *Ukrainian Chemistry Journal.* 1984. Vol. 50. № 8. P. 831–835.

Horbenko Yu.Yu., Tsizh B.R., Aksimentyeva O.I., Olenych I.B., Bogatyrev V.M., Dzeryn M.R. Effect of the modified silica on the conductivity and sensory properties of polyaniline nanocomposites. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies.* 2019. Vol. 21. № 91. P. 29–37. https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9106.

Ilhan-Ayisigi E., Yesil-Celiktas O. Silica-based organic-inorganic hybrid nanoparticles and nanoconjugates for improved anticancer drug delivery. *Engineering in Life Sciences.* 2018. Vol. 18. №. 12. P. 882–892. https://doi.org/10.1002/elsc.201800038.

Li X., Wang G., Lib X. Surface modification of nano-SiO2 particles using polyaniline. *Surface and Coatings Technology.* 2005. Vol. 197. P. 56–60. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.11.021.

Liberman A., Mendez N., Trogler W.C., Kummel A.C. Synthesis and surface functionalization of silica nanoparticles for nanomedicine. *Surface Science Reports.* 2014. Vol. 69. № 5. P. 132–158. https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2014.07.001.

Liu P. Preparation and characterization of conducting polyaniline/silica nanosheet composites, *Current Opinion in Solid State and Materials Science.* 2008. Vol. 12. P. 9–13. https://doi.org/10.3329/bjsir.v47i3.13055.

Meer S., Kausar A., Iqbal T. Attributes of polymer and silica nanoparticle composites: A review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering.* 2015. Vol. 55. №. 8. P. 826–861. https://doi.org/10.1080/03602559.2015.1103267.

Paul D.R., Robeson L.M. Polymer Nanotechnology: Nanocomposites, *Polymer.* 2008. № 49. P. 3187–3204. http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2008.04.017.

Park D.H., Hwang S.J., Oh J.M., et al. 2013. Polymer-inorganic supramolecular nanohybrids for red, white, green, and blue applications. *Progress in Polymer Science.* 2013. Vol. 38. № 10–11. P. 1442–1486. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.007.

Roosz N., Euvrard M., Lakard B., Cédric C., et al. Synthesis and characterization of polyaniline-silica composites: Raspberry vs core-shell structures. Where do we stand? *Journal of Colloid and Interface Science.* 2017. Vol. 502. P. 184–192. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.04.092.

Zhang D., Wu J., Zhang R.Q., Liu C. A family of stable silica fullerenes with fully coordinated structures, *The Journal of Physical Chemistry B.* 2006. Vol. 110. № 36. P. 17757–17762. https://doi.org/10.1021/jp060204n.

References

Aksimentieva, O., Boghatyrjov, V., & Martynjuk, G., et al. (2015). Syntez i elektrychni vlastyvosti kompozytiv polianilinu z nanochastynkamy sylicij(IV) oksydu [Synthesis and electrical properties of polyaniline composites with silicon(IV) oxide nanoparticles]. *Naukovi zapysky Ternopiljsjkogho nacionaljnogho pedaghoghichnogho universytetu imeni Volodymyra Ghnatjuka, Serija Khimija [Scientific notes of Ternopil National Pedagogical University named after Volodymyr Hnatyuk. Chemistry Series],* 22, 11–14 [in Ukrainian].

Aksimentieva, O., Cizh, B., & Chokhanj M. (2017). Sensory kontrolju ghazovykh seredovyshh u kharchovij promyslovosti ta dovkilli: monoghraf. [Gas environment control sensors in the food industry and the environment: monograph]. Lviv : Piramida [in Ukrainian].

Ghoncharuk, O.V., Malysheva, M.L., Zarko, V.I., & Ghrycenko, V.F. (2010). Strukturoutvorennja v dyspersijakh piroghennogho kremnezemu v prysutnosti neindyferentnykh elektrolitiv [Structure formation in pyrogenic silica dispersions in the presence of non-indifferent electrolytes]. *Nanostrukturne materialoznavstvo [Nanostructural materials science],* 2, 16–23 [in Ukrainian].

Zarko, V., Kozub, Gh., & Syvalov, E., et al. (1988). Kyslotni centry poverkhni piroghennogho tytanokremnezemu [Acid centers of the surface of pyrogenic titano-silica]. *Ukrainskij Khimicheskij Zhurnal [Ukrainian Chemistry Journal],* 54(11), 1144–1146 [in Ukrainian].

Martyniuk, G.V. (2024). Fizyko-khimija polimer-polimernykh kompozytiv z kontroljovanymy funkcionaljnymy vlastyvostjamy [Physico-chemistry of polymer-polymer composites with controlled functional properties]. *Doctor's thesis.* Lviv. 378 p. [in Ukrainian].

Opainych, I.Ye., Aksimentieva, O.I., Diakonov, V.P., Piekhota, S., Ulanskyi, Ya., Demchenko, P. Yu., & Ukrainets, A.M. (2012). Struktura i termodeformatsiini vlastyvosti hibrydnykh kompozytiv polimer–mahnetyt [Structure and thermal deformation properties of polymer-magnetite hybrid composites]. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv [Physico-chemical mechanics of materials],* 1, 89–94. [Electronic resource] URL: http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/138407 (access date 31.08.2024) [in Ukrainian].

Ostapovych, B., & Semenjuk, Ju. (2008). Polimeryzacija anilinu na poverkhni dyspers-nogho oksydu kremniju [Polymerization of aniline on the surface of dispersed silicon oxide]. *Visnyk Ljviv. Un-tu. Serija khim [Visnyk Lviv. Univ. Chem.],* 49 (2), 112–117 [in Ukrainian].

Filonenko, O.V., & Lobanov, V.V. (2010). Ctruktura ta vlastyvosti nanoklasteriv kremnezemu (Oghljad) [Structure and Properties of Silica Nanoclusters (Review)]. *Fizyka i khimija tverdogho tila [Solid state physics and chemistry],* 11 (1), 138−149 [in Ukrainian].

Aksimentyeva, O., Martyniuk, G., Horbenko, Yu., Malynych, S., & Filipsonov R. (2020). Polymer-magnetite thermosetting composites with protective and antiradar functions. *Special issue of the journal «Physical and chemical mechanics of materials».* L.: pp. 137−140 [in English].

Aksimentyeva, O.I., Chepkov, I.B., Filipsonov, R.V., Malynych, S.Z., Gamernyk, R.V., Martyniuk, G.V., & Horbenko Yu.Yu. (2020). Hybrid Composites with Low Reflection of IR Radiation. *Physics and chemistry of solid state,* 21 (4), P. 764−770. https://doi.org/10.15330/pcss.21.4.764-770 [in English].

Bapat, G., Labade, C., Chaudhari, A., & Zinjarde, S. (2016). Silica nanoparticle based techniques for extraction, detection, and degradation of pesticides. *Advances in Colloid and Interface Science,* 237, 1−14. https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.06.001 [in English].

Bogatyrev, V.M., Borisenko, L.I., & Oranskaya, E.I., et al. (2010). Influence of synthesis conditions on the structural characteristics of NiO/SiO_2 oxide nanocomposites. *Surface,* 2 (17), 178–189. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.06.044 [in English].

Bogatyrev, V.M., & Chuiko, A.A. (1984). Interaction of phosphorus trichloride with dehydrated aerosil on its surface. *Ukrainian Chemistry Journal,* 50 (8), 831–835 [in English].

Horbenko, Yu.Yu., Tsizh, B.R., Aksimentyeva, O.I., Olenych, I.B., Bogatyrev, V.M., & Dzeryn, M.R. (2019). Effect of the modified silica on the conductivity and sensory properties of polyaniline nanocomposites. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies,* 21 (91), 29−37. https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9106 [in English].

Ilhan-Ayisigi, E., & Yesil-Celiktas, O. (2018). Silica-based organic-inorganic hybrid nanoparticles and nanoconjugates for improved anticancer drug delivery. *Engineering in Life Sciences,* 18 (2), 882–892. https://doi.org/10.1002/elsc.201800038 [in English].

Li, X., Wang, G., & Lib, X. (2005). Surface modification of nano-SiO_2 particles using polyaniline. *Surface and Coatings Technology,* 197, 56–60. https://doi.org/10.3329/bjsir.v47i3.13055 [in English].

Liberman, A., Mendez, N., Trogler, W.C., & Kummel, A.C. (2014). Synthesis and surface functionalization of silica nanoparticles for nanomedicine. *Surface Science Reports,* 69 (5), 132–158. https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2014.07.001 [in English].

Liu, P. (2008). Preparation and characterization of conducting polyaniline/silica nanosheet composites, *Current Opinion in Solid State and Materials Science,* 12, 9–13. https://doi.org/10.3329/bjsir.v47i3.13055 [in English].

Meer, S., Kausar, A., & Iqbal, T. (2015). Attributes of polymer and silica nanoparticle composites: A review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering,* 55 (8), 826–861. https://doi.org/10.1080/03602559.2015.1103267 [in English].

Paul, D.R., & Robeson, L.M. (2008). Polymer Nanotechnology: Nanocomposites, *Polymer.* 49, 3187–3204. http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2008.04.017 [in English].

Park, D.H., Hwang, S.J., & Oh, J.M., et al. (2013). Polymer-inorganic supramolecular nanohybrids for red, white, green, and blue applications. *Progress in Polymer Science,* 8 (10–11), 1442−1486. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.007 [in English].

Roosz, N., Euvrard M., Lakard, B., & Cédric, et al. (2017). Synthesis and characterization of polyaniline-silica composites: Raspberry vs core-shell structures. Where do we stand? *Journal of Colloid and Interface Science*, 502, 184−192. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.04.092 [in English].

Zhang, D., Wu, J., Zhang, R.Q., & Liu, C. (2006). A family of stable silica fullerenes with fully coordinated structures, *The Journal of Physical Chemistry B,* 110 (36), 17757−17762. https://doi.org/10.1021/jp060204n [in English].

Отримано: 18.10.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

УДК 54.08
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.8

АНАЛІЗ ВМІСТУ БІЛКІВ В РІЗНИХ ВИДАХ МОЛОКА ШЛЯХОМ ТИТРУВАННЯ

Р. П. Мигущенко[1], М. М. Волобуєв[2], І. В. Асєєва[3], О. Ю. Кропачек[4], В. М. Балєв[5]

Білки є незамінним компонентом харчових продуктів. Мають різноманітні біологічні особливості, які не властиві жодним іншим органічним сполукам. Фізичні та хімічні перетворення, спроможність до внутрішньо молекулярної взаємодії, наявність каталітичних, рецепторних властивостей забезпечують необхідні організму людини функції і беруть участь у важливих процесах, таких як утворення антитіл, транспортування кисню в організмі, травленні. Одним з харчових продуктів з високим вмістом білка є молоко. У ході дослідження на основі аналізу наукових праць обґрунтовано, що для визначення вмісту білків у молоці і молочних продуктах було розглянуто і класифіковано декілька різних методів виявлення кількості білків у молоці та обрано доцільний метод для проведення лабораторних та практичних оцінок. Стаття присвячена дослідженню

[1] доктор технічних наук, професор,
проректор з науково-педагогічної роботи
(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків)
e-mail: mrp1@ukr.net
ORCID: 0000-0002-3287-9772
[2] кандидат хімічних наук, доцент,
професор кафедри загальної неорганічної хімії
(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків)
e-mail: Maksym.Volobuyev@khpi.edu.ua
ORCID: 0000-0001-9779-1176
[3] кандидат педагогічних наук,
доцент кафедри загальної та неорганічної хімії
(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків)
e-mail: aseevairina0@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9678-2681
[4] доктор технічних наук, професор,
професор кафедри теоретичних основ електротехніки
(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків)
e-mail: kropachek@ukr.net
ORCID: 0000-0001-5899-0252
[5] кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем
(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків)
e-mail: bvnbvn@ukr.net
ORCID: 0000-0002-6803-4739

вмісту білків в молоці тваринного та рослинного походжень на основі методики титрування оцтовою кислотою. У даній роботі застосовувався метод титрометричного аналізу завдяки оптимальному співвідношенню точності та простоти реалізації. До експериментів запропоновано коров'яче, козине, мигдальне, кокосове та вівсяне молоко. Визначено, що найвищий показник вмісту білків знаходиться в мигдалевому молоці. Результати вимірювань оброблено на виявлення розкиду показників (дисперсії) та прояву і усунення недоліків у спостереженнях. За даними отримані діаграми, які візуально відображають кількість білку в різних видах і конкретних зразках досліджуваного молока. Визначені абсолютна (0.2–0.66 мл) і відносна похибки вимірювань на основі домінуючої інструментальної похибки. Подальші дослідження направлені на отримання кількісної оцінки емпіричного коефіцієнту k при використанні оцтової кислоти в якості реагенту при титруванні.

Ключові слова: *молоко, вміст білку, титрування, оцтова кислота, похибка вимірювання, концентрація.*

ANALYSIS OF PROTEIN CONTENT IN DIFFERENT TYPES OF MILK BY TITRATION

R. P. Mygushchenko, M. M. Volobuyev, I. V. Asieieva, O. Yu. Kropachek, V. M. Baliev

Proteins are an essential component of food products, having unique biological properties not found in any other organic compounds. Their physical and chemical transformations, ability to engage in intramolecular interactions and catalytic and receptor properties ensure vital human body functions, participating in critical processes such as antibody formation, oxygen transportation, and digestion. Milk is one of the food products with a high protein content. This study, based on the analysis of scientific literature, reviews and classifies several methods for determining protein content in milk and dairy products, ultimately identifying the most suitable method for both laboratory and industrial applications. The article explores the protein content in animal- and plant-based milk using the acetic acid titration method. The titrimetric analysis method is chosen due to its optimal balance of accuracy and simplicity. The experiments included cow, goat, almond, coconut and oat milk, revealing that almond milk have the highest protein content. The resulting data are analyzed to assess the variability of the measurements (dispersion) and to identify and eliminate observational errors. Diagrams are constructed based on the data, visually representing the protein content in different types and specific samples of the studied milk. Absolute (0.2–0.66 ml) and relative measurement errors are calculated, primarily stemming from the dominant instrumental error. Future research is focused on deriving a quantitative estimate of the empirical coefficient k when using acetic acid as the titration reagent.

Key words*: milk, protein content, titration, acetic acid, measurement error, concentration.*

Вступ

Білки – незамінний компонент їжі. Вони виконують в організмі людини різноманітні біологічні функції; необхідність їх постійного відновлення базується на основі обміну речовин (Subroto et al., 2020).

Полімерні молекули білків складаються із залишків амінокислот, з'єднаних пептидним зв'язком. Про наявність білка в продукті можна судити за якісними реакціями, які зумовлені характерними частками амінокислот. Кількісне визначення білків, як правило, також базується на властивостях окремих їх часток і не враховує можливих відхилень побудови в іншій частині білкових макромолекул (Ahmad et al., 2023).

Для визначення вмісту білків у молоці і молочних продуктах існує декілька різних груп методів. Всі вони мають свої переваги, недоліки та сферу застосування. Це методи, що базуються на визначенні у білках вмісту нітрогену (метод К'єльдаля, метод Дюма), вмісту карбоксильних груп (метод формольного титрування), здатності поглинати світло в ультрафіолетовій та видимій області спектру (спектрофотометрія) забарвлених продуктів деяких реакцій (біуретовий метод, метод Лоурі), за кількістю зв'язаних барвників (амідо чорний 10 B, оранжевий G, кислий оранжевий 12, метод Бредфорда з кумасі голубим G 250) тощо. Багато з цих методів використовується у лабораторних і наукових дослідженнях. В промисловості найчастіше застосовуються стандартизовані класичні методи: К'єльдаля, формольного титрування, колориметрії та рефрактометрії (Ahmad et al., 2023).

У даній роботі використовувався метод титрометричного аналізу завдяки оптимальному співвідношенню точності та простоти реалізації (Сухан та ін., 2022).

Для молочного білку характерним показником є кількість вільних аміногруп. Кислотність молока пояснюють тим, що вільних карбоксильних груп у молочному білку більше, ніж амінних. Під впливом альдегідної групи аміногрупа втрачає свої основні властивості і кислотно-лужний баланс порушується. Кількість карбоксильних груп при титруванні буде еквівалентна кількості зв'язаних амінних груп.

Суть даного методу полягає у тому, що в розчин додається надлишкова кількість оцтової кислоти, яка зв'язує наявні аміногрупи і вивільняє карбоксильні групи (Roy, 2020):

$$–OOC–RCH–NH_2 + HAc = –OOC–RCH–NH_3^+ + Ac^-$$

Далі суміш титрується гідроксидом натрію, при цьому відтитровується надлишок оцтової кислоти, а також карбоксильні групи амінокислот:

$$CH_3COOH + NaOH = CH_3COONa + H_2O$$

Матеріал і методи

Метою досліджень, що представлені в статті, є спроба визначення вмісту білка у різних видах тваринного і рослинного походження за допомогою титрування з використанням оцтової кислоти (Romulo, 2022). Використання оцтової кислоти дозволить здійснювати безпечні лабораторні та промислові дослідження по вмісту білка в конкретному зразку молока (Ластов'як та ін., 2004).

Для експериментів використовується коров'яче, козине (Tulashie et al., 2022), мигдальне (Antunes et al., 2022), кокосове (Yu et al., 2023) та вівсяне молоко. Для проведення експериментів підготовлені бюретка, колба 100 мл, піпетка, хімічний стакан на 200 мл, розчин NaOH з концентрацією 0.1 моль/л, оцтова кислота CH_3COOH з концентрацією 2 моль/л, індикатор фенолфталеїн (Пономарьова, 2022).

Порядок дій для визначення вмісту білка ідентичні для всіх видів молока. Всі дії виконуються за наступним алгоритмом:

1. За допомогою піпетки здійснюється відбір 10 мл досліджуваного молока, який переноситься у конічну колбу 100 мл.
2. В колбу додається 10 крапель розчину фенолфталеїну.
3. Здійснюється титрування розчином NaOH до сталого забарвлення досліджуваного молока у слабо малиновий колір.
4. Фіксується по бюретці об'єм витраченого розчину NaOH (V_1).
5. За допомогою піпетки в колбу з хімічного стакана додається 2 мл розчину CH_3COOH. Після збовтування вмісту колби малинове забарвлення фенолфталеїну зникає.
6. Продовжується титрування розчином NaOH до сталого забарвлення досліджуваного молока в слабо малиновий колір.
7. Фіксується по бюретці об'єм витраченого розчину NaOH (V_2).
8. Вміст білку (X, %) визначається за формулою:

$$X=(V_2 - V_1) \cdot N \cdot k, \quad (1)$$

де N – концентрація розчину NaOH;

k – емпіричний коефіцієнт, приймає різні сталі значення при використанні різних кислот.

Вигляд зразків молока при проведенні дослідження за наведеним вище алгоритмом представлений на рис. 1.

Результати та обговорення

Формула (1) дозволяє визначити поточний вміст білка в конкретному зразку молока. Проте, у формулу (1) входить емпіричний коефіцієнт k, який може бути визначеним експериментально для конкретних реактивів при титруванні. Коефіцієнт k визначається шляхом калібрування методом титрування на еталонних зразків молока з точно встановленим вмістом білку у них. Після цього k використовується як стала величина для конкретного виду молока (коров'яче, козине, мигдальне, вівсяне, кокосове).

У даному дослідженні точні значення коефіцієнту k не встановлювалися, а були прийняті рівними одиниці. Проте навіть такий спрощений підхід дозволяє класифікувати різні види молока за вмістом білка. Для цього були усереднені отримані значення V_1 і V_2 при титруванні п'яти зразків кожного виду досліджуваного молока. Ці значення наведені у табл. 1.

Для формування останнього стовпчика табл. 1 використовувалась формула:

$$X = K \cdot k, \quad (2)$$

де K – коефіцієнт, який визначається як $K = (V_2–V_1) \cdot N$;

k – емпіричний коефіцієнт, прийнятий рівним 1.

Рис. 1. Зовнішній вигляд досліджуваних зразків молока після першого та другого етапів титрування

Таблиця 1

Усереднені результати титрування п'яти зразків кожного виду молока

Вид молока	V_1	V_2	$(V_2–V_1) \cdot N$
Мигдалеве	0.052	55.486	5.5434
Козине	1.95	35.91	3.396
Коров'яче	2.23	37.88	3.565
Кокосове	0.056	35.02	3.4964
Вівсяне	0.56	30.74	3.018

Формула (2) є окремим випадком формули (1). Вибір $k = 1$ не створює адитивних і мультиплікативних збурень на формулу (1).

На рис. 2–6 представлені графіки даних V_1 і V_2 як $K = f(i)$, де i – порядковий номер проби. Візуалізація даних дозволяє оцінити методичні похибки проведених експериментів.

Залежності $X = f(\text{проба})|_{\text{вид молока}} = var$ на рис. 2–6 виконані в єдиних масштабах для зручності порівняння оцінок.

З рис. 2–6 видно, що при проведенні експериментів існує деякий розкид даних. Такий розкид даних оцінюється дисперсією. Дані дисперсії наведені в табл. 2.

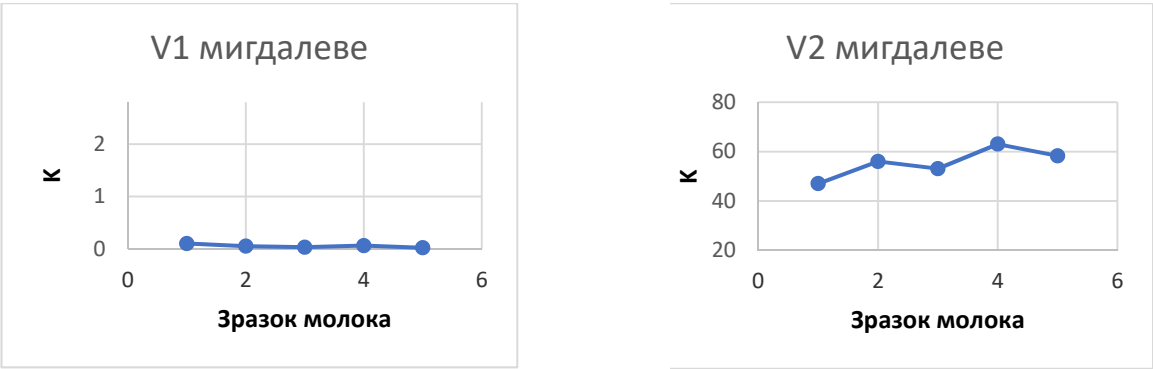


Рис. 2. Мигдалеве молоко

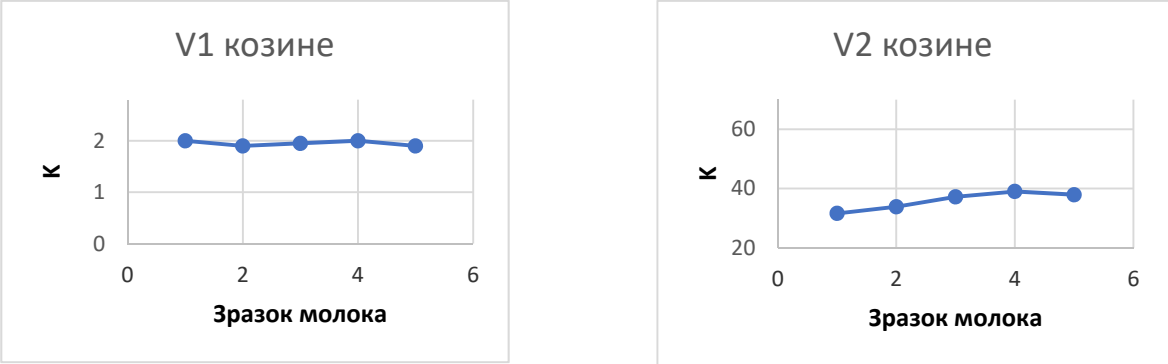


Рис. 3. Козине молоко

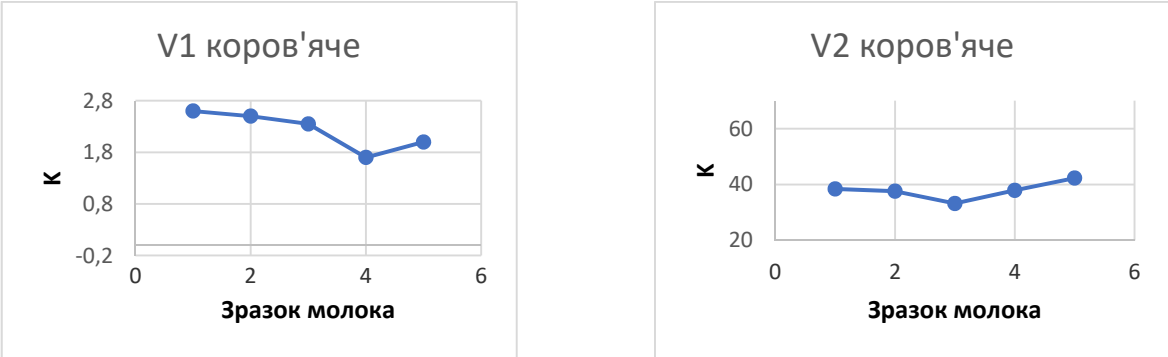


Рис. 4. Коров’яче молоко

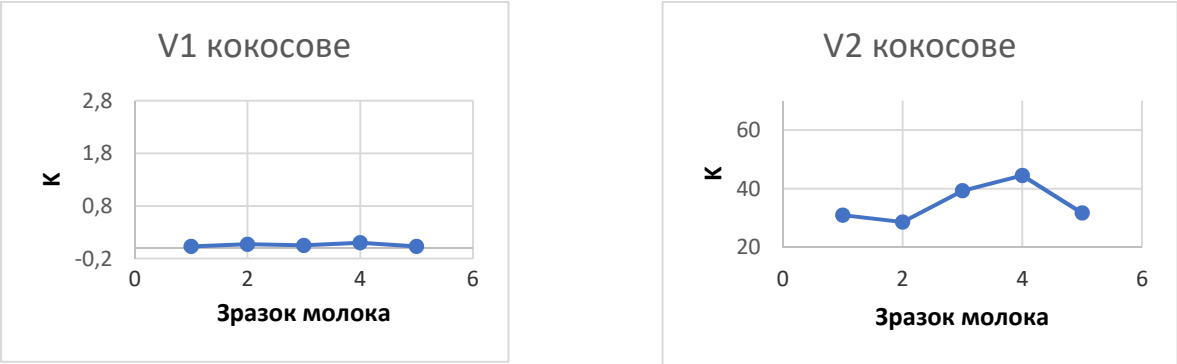


Рис. 5. Кокосове молоко

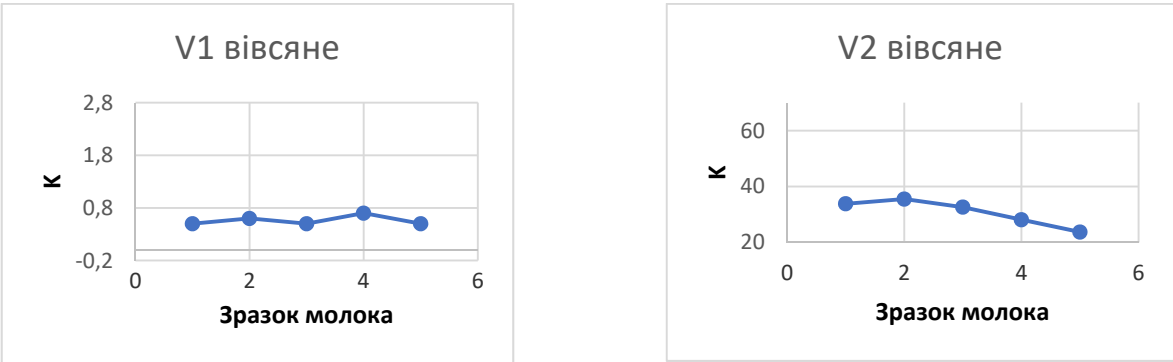


Рис. 6. Вівсяне молоко

Таблиця 2

Визначені дисперсії D показників V_1 і V_2

Вид молока	D_{V1}	D_{V2}	$D_{(V2-V1)\cdot N}$
Мигдалеве	0.00097	35.62123	0.358136
Козине	0.0025	9.498	0.095292
Коров'яче	0.1395	10.447	0.113225
Кокосове	0.00088	44.11145	0.438655
Вівсяне	0.008	23.003	0.23037

За даними табл. 2 побудовані діаграми, які візуально відображають дані експериментів при конкретних зразках досліджуваного молока (рис. 7).

За рис. 7 можна оцінити методичну похибку результатів у проведених експериментах. З рис. 7 очевидно, що методична похибка є домінуючою.

З рис. 2–6 очевидні промахи при проведенні експериментів для:

1) проби 1, 4 при визначенні V_2 для мигдалевого молока;

2) проба 4 при визначенні V_1 для коров'ячого молока;

3) проби 3, 4 при визначенні V_2 для кокосового молока;

4) проби 4, 5 при визначенні V_2 для вівсяного молока.

Для зменшення результуючих похибок доцільно виключити дані проби з обробки результатів вимірювання (Іщенко, 2023). Після виключення вказаних грубих промахів були отримані уточнені, представлені у табл. 3.

Дані табл. 3 надають менший розкид параметрів при визначенні кількості білків у молоці.

За даними табл. 3 отримані діаграми, які візуально відображають кількість білку

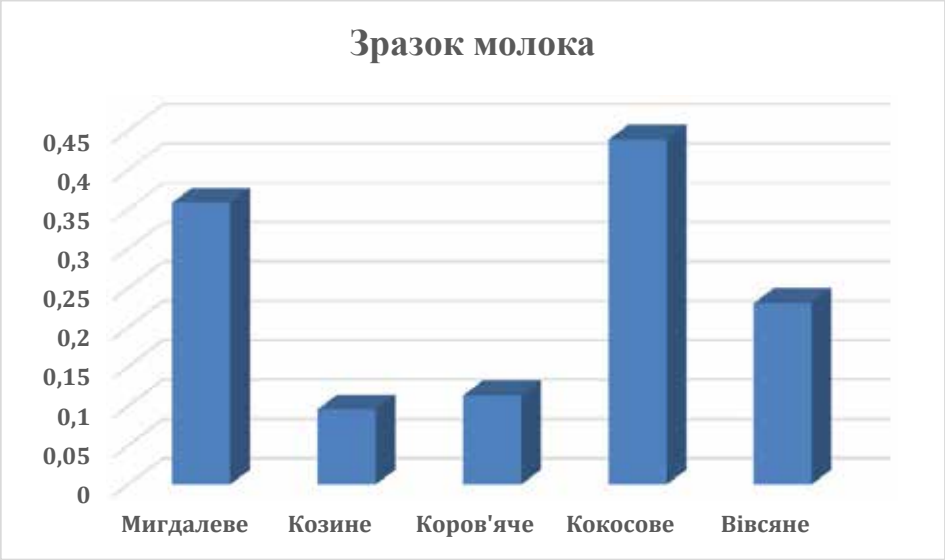


Рис. 7. Розкид експериментальних даних для різних зразків досліджуваного молока

Таблиця 3

Уточнені усереднені результати титрування п'яти зразків кожного виду молока

Вид молока	V_1	V_2	$(V_2-V_1)\cdot N$
Мигдалеве	0.05	53.59	5.35
Козине	1.95	35.91	3.40
Коров'яче	2.36	37.88	3.55
Кокосове	0.04	30.43	3.04
Вівсяне	0.53	33.96	3.34

в різних видах молока і конкретних зразках досліджуваного молока (рис. 8).

Для оцінки похибок отриманих результатів доцільно використати стандартний метод визначення інструментальних похибок, який ґрунтується на формулі (Защепкіна та ін., 2021):

$$X \pm \Delta X = (V_2 \pm \Delta V_2 - V_1 \pm \Delta V_1) \cdot N \pm \Delta N,$$

де ΔX – похибка визначення показника, пропорційного вмісту білків в різних типах молока;

ΔV_1 – абсолютна похибка визначення об'єму V_1;

ΔV_2 – абсолютна похибка визначення об'єму V_2;

ΔN – абсолютна похибка визначення концентрації лугу N.

У даних експериментах показники абсолютної похибки ΔV_1, ΔV_2, ΔN визначені так: ΔV_1=0.1; ΔV_2=0.1; ΔN=0.01.

Похибка при визначенні вмісту білка для коров'ячого молока (на основі формули (1)):

$$X=(37.88\pm0.1-2.36\pm0.1)\cdot0.1\pm0.01;$$

$$X_1=(37.88-2.36)\cdot0.1=3.552;$$

$$X_2=(37.98-2.26)\cdot0.11=3.929;$$

$$\Delta X=(X_2-X_1)=0.38.$$

Для визначення максимально можливої відносної похибки вимірювання у відсотках, необхідно використати формулу (Тичков та ін., 2021):

$$\delta X = \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\,\%$$

Результати розрахунків похибок наведені у табл. 4.

Високе значення відносної похибки (%) визначається низькими значеннями об'єму V_1, що, нажаль, закладено у використаній методиці. Проте модифікація методики визначення вмісту білка не входила у задачі даного дослідження.

Висновки

У результаті проведених досліджень отриманий відносний вміст білка у різних видах (тваринних і рослинних) молока – мигдалевому, козиному, коров'ячому, кокосовому, вівсяному. Одержана оцінка похибки визначення вмісту білка доводить, що обрана методика містить принципові недоліки і потребує уточнення. Досліджені зразки молока за зменшенням вмісту білка утворюють ряд

мигдалеве → коров'яче → козине → вівсяне → кокосове.

Очікуваним результатом є вищий вміст білка в молоці тваринного походження

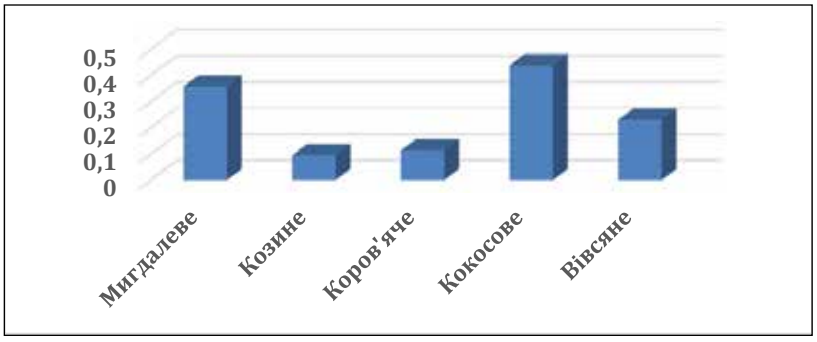


Рис. 8. Визначений відносний вміст білка у різних видах молока

Таблиця 4

Оцінка абсолютної та відносної похибки визначення вмісту білка

Вид молока	**Абсолютна похибка ΔX, мл**	**Відносна похибка δX, %**
Мигдалеве	0.55	10.3
Козине	0.20	5.9
Коров'яче	0.38	10.7
Кокосове	0.32	10.5
Вівсяне	0.66	19.8

в порівнянні з рослинними альтернативами (Craig & Fresán, 2021). Проте результати дослідження показали, що найвищий показник вмісту білків знаходиться в мигдалевому молоці (Lim et al., 2021).

Ознайомившись з етикеткою на упаковці молока, було виявлено, що мигдалеве молоко, яке використовувалось в експериментах, було виготовлене з мигдалевого порошку. Це означає, що це не натуральне мигдалеве молоко, а замінник, створений для зниження фінансових затрат (Vincent et al., 2016). Тому проведені дослідження дозволили відпрацювати методику по виявленню ненатуральності молока.

Подальші дослідження планується направити на отримання кількісної оцінки емпіричного коефіцієнту *k* при використанні оцтової кислоти CH_3COOH.

Список використаної літератури

Защепкіна Н.М., Шульга О.В., Наконечний О.А. Метрологічне забезпечення інформаційно-вимірювальних систем: навч. посіб. Київ : Вид-во КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 176 с.

Іщенко М.В. Забезпечення і контроль якості аналізу: навч. посіб. Київ, 2023. 73 с.

Ластов'як Я.В., Караман Н.С., Полутаренко М.С., Паздерський Ю.А. Оцтова кислота. Властивості, використання, виробництво: монографія. Львів : Вид-во НУ «Львів Політехніка», 2004. 166 с.

Пономарьова В.В. Основи хімії: навчальний посібник. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2022. 160 с.

Сухан В.В., Трохименко О.М., Трохименко А.Ю. Аналітичні реагенти й техніка приготування їхніх розчинів: підручник. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2022. 592 с.

Тичков В.В., Гальченко В.Я., Трембовецька Р.В. Метрологічне забезпечення фізико-хімічних вимірювань: навч.-метод. посіб. Черкаси, 2021. 253 с.

Ahmad W., Asad N., Aryal P., Dwivedi S., Hatwar A., Tanksale, A. Acetic acid and co-chemicals production from syngas. *Advances in Synthesis Gas: Methods, Technologies and Applications.* 2023. Vol. 3. P. 199–223. https://doi.org/10.1016/b978-0-323-91878-7.00010-1.

Antunes I. C., Bexiga R., Pinto C., Roseiro L. C., Quaresma M. A. G. Cow's Milk in Human Nutrition and the Emergence of Plant-Based Milk Alternatives. *Foods.* 2023. Vol. 12(1). https://doi.org/10.3390/foods12010099.

Craig W.J., Fresán U. International Analysis of the Nutritional Content and a Review of Health Benefits of Non-Dairy Plant-Based Beverages. *Nutrients.* 2021. Vol. 13 (3), 842. P. 1–14. https://doi.org/10.3390/nu13030842.

Lim M.T., Pan B.J., Toh D.W.K., Sutanto C.N., Kim J.E. Animal Protein versus Plant Protein in Supporting Lean Mass and Muscle Strength: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Nutrients.* 2021. Vol. 13(2), 661. P. 1–18. https://doi.org/10.3390/nu13020661.

Romulo A. Nutritional Contents and Processing of Plant-Based Milk: A Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2022. Vol. 998. P. 1–10. https://doi:/org.10.1088/1755-1315/998/1/012054.

Roy D., Ye A., Moughan P.J., Singh H. Composition, Structure, and Digestive Dynamics of Milk From Different Species-A Review. *Frontiers in Nutrition.* 2020. Vol. 7. P. 1–17. https://doi.org/10.3389/fnut.2020.577759._

Subroto E., Lembong E., Filianty F., Indiarto R., Primalia G., Putri M.S.K.Z., Theodora H.C., Junar S. The Analysis Techniques of Amino Acid And Protein In Food And Agricultural Products. *International journal of scientific & technology research.* 2020. Vol. 9 (10). P. 29–36.

Tulashie S.K., Amenakpar J., Atisey S., Odai R., Akpari E.E. A. Production of coconut milk: A sustainable alternative plant-based milk. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering.* 2022. Vol. 6. P. 1–8. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100206.

Vincent D., Elkins A., Condina M.R., Ezernieks V., Rochfort S. Quantitation and Identification of Intact Major Milk Proteins for High-Throughput LC-ESI-Q-TOF MS Analyses. *PlOS one.* 2016. Vol. 11 (10). P. 1–21. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163471.

Yu Y., Li X., Zhang J., Li X., Wang J., Sun B. Oat milk analogue versus traditional milk: Comprehensive evaluation of scientific evidence for processing techniques and health effects. *Food chemistry: X.* 2023. Vol. 19. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100859.

References

Zashchepkina, N.M., Shulha, O.V., & Nakonechnyi, O.A. (2021). Metrolohichne zabezpechennia informatsiino-vymiriuvalnykh system: navch. posib. [Metrological support of information and measurement systems: training. manual]. Kyiv : Vyd-vo KPI im. Ihoria Sikorskoho [in Ukrainian].

Ishchenko, M.V. (2023). Zabezpechennia i kontrol yakosti analizu: navch. posib [Ensuring and controlling the quality of analysis: teacher manual]. Kyiv [in Ukrainian].

Lastoviak, Ya.V., Karaman, N.S., Polutarenko, M.S., & Pazderskyi, Yu.A. (2004). Otstova kyslota. Vlastyvosti, vykorystannia, vyrobnytstvo: monohrafiia [Acetic acid. Properties, use, production: monograph]. Lviv : Vydavnyztvo Lviv Polytechnic National University [in Ukrainian].

Ponomarova, V.V. (2022). Osnovy khimii: navchalnyi posibnyk [The basics of chemistry: a study guide]. Kyiv : Publishiing center "Kyiv university" [in Ukrainian].

Sukhan, V.V., Trokhymenko, O.M., & Trokhymenko, A.Yu. (2022). Analitychni reahenty y tekhnika pryhotuvannia yikhnikh rozchyniv: pidruchnyk [Analytical reagents and the technique of preparing their solutions: a textbook]. Kyiv : Publishiing center "Kyiv university" [in Ukrainian].

Tychkov, V.V., Halchenko, V.Ya., & Trembovetska, R.V. (2021). Metrolohichne zabezpechennia fizyko-khimichnykh vymiriuvan: navch.-metod. posib. [Metrological support of physical and chemical measurements: educat. and method. manual]. Cherkasy [in Ukrainian].

Ahmad, W., Asad, N., Aryal, P., Dwivedi, S., Hatwar, A., & Tanksale, A. (2023). Acetic acid and co-chemicals production from syngas. *Advances in Synthesis Gas: Methods, Technologies and Applications,* 3, 199–223. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91878-7.00010-1 [in English].

Antunes, I.C., Bexiga, R., Pinto, C., Roseiro, L.C., Quaresma, M.A.G. (2023). Cow's Milk in Human Nutrition and the Emergence of Plant-Based Milk Alternatives. *Foods,* 12 (1), 9. https://doi.org/10.3390/foods12010099 [in English].

Craig, W.J., & Fresán, U. (2021). International Analysis of the Nutritional Content and a Review of Health Benefits of Non-Dairy Plant-Based Beverages. *Nutrients*, 13 (3), 842, 1–14. https://doi.org/10.3390/nu13030842 [in English].

Lim, M.T., Pan, B.J., Toh, D.W.K., Sutanto, C.N., & Kim, J.E. (2021). Animal Protein versus Plant Protein in Supporting Lean Mass and Muscle Strength: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Nutrients,* 13 (2), 661, 1–18. https://doi.org/10.3390/nu13020661 [in English].

Romulo, A. (2022). Nutritional Contents and Processing of Plant-Based Milk: A Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* 998, 1–10. https://doi:/org.10.1088/1755-1315/998/1/012054 [in English].

Roy, D., Ye, A., Moughan, P.J., & Singh, H. (2020). Composition, Structure, and Digestive Dynamics of Milk From Different Species-A Review. *Frontiers in Nutrition*, 7, 1–17. https://doi.org/10.3389/fnut. [in English].

Subroto, E., Lembong, E., Filianty, F., Indiarto, R., Primalia, G., Putri, M.S.K.Z., Theodora, H.C., & Junar, S. (2020). The Analysis Techniques of Amino Acid And Protein In Food And Agricultural Products. *International journal of scientific & technology research*, 9 (10), 29–36 [in English].

Tulashie, S.K., Amenakpar, J., Atisey, S., Odai, R., & Akpari, E.E.A. (2022). Production of coconut milk: A sustainable alternative plant-based milk. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100206 [in English].

Vincent, D., Elkins, A., Condina, M.R., Ezernieks, V., & Rochfort, S. (2016). Quantitation and Identification of Intact Major Milk Proteins for High-Throughput LC-ESI-Q-TOF MS Analyses. *PlOS one*, 11 (10), 1–21. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163471 [in English].

Yu, Y., Li, X., Zhang, J., Li, X., Wang, J., & Sun, B. (2023). Oat milk analogue versus traditional milk: Comprehensive evaluation of scientific evidence for processing techniques and health effects. *Food chemistry: X*, 19. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.10085 [in English].

Отримано: 21.10.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

УДК 546.47;546.713;546.62
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.9

СИНТЕЗ І ДОСЛІДЖЕННЯ АЛЮМІНІЙ-ЗАМІЩЕНИХ ШПІНЕЛЕЙ НА ОСНОВІ $ZNMN_2O_4$: СТРУКТУРА, ВЛАСТИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

С. А. Неділько[1], О. В. Іванов[2]

Шпінелі є важливими функціональними матеріалами, які активно досліджуються через їхні перспективні властивості в таких галузях, як каталіз, сенсори, акумулятори тощо. Алюміній-заміщені шпінелі на основі $ZnMn_2O_4$ можуть мати покращені властивості порівняно з іншими матеріалами цього класу завдяки їх стабільності, широкому діапазону регулювання ширини забороненої зони та високій пористості. Актуальність роботи підкреслюється необхідністю пошуку нових матеріалів з контрольованими властивостями для використання у високотехнологічних галузях, енергетиці, для адаптації каталізатора під модифікований субстрат.

У статті представлені результати синтезу та комплексного дослідження властивостей алюміній-заміщених шпінелей складу $Zn_{(1-x)}Al_xMn_2O_4$ (x = 0,05, 0,10, 0,15, 0,20, 0,25, 0,30), синтезованих за допомогою золь-гель методу. Для структурної характеристики та визначення фазового складу застосовували методи рентгенівської дифрактометрії (XRD), інфрачервоної спектроскопії (FTIR), спектроскопії дифузного відбиття (DRS) і скануючої електронної мікроскопії (SEM).

Розмір кристалітів оцінено за допомогою рівняння Шеррера. Рентгенофазовий аналіз засвідчив однофазність усіх зразків незалежно від рівня заміщення, що вказує на стабільність отриманих структур. Структурне уточнення проведено за допомогою методу Рітвельда, що продемонструвало високу відповідність експериментальних дифрактограм теоретичним моделям. Встановлено основні параметри елементарної комірки та рентгенівську густину. Проаналізовано зміну відстаней метал–оксид у координаційних поліедрах.

ІЧ-спектроскопія показала наявність трьох смуг поглинання в діапазоні від 1000 до 385 $см^{-1}$ для референсного та заміщених зразків із поступовим зсувом у довгохвильову область. Ширина забороненої зони, розрахована за функцією Кубелки-Мунка та графічним методом Тауца, змінюється від 2,76 еВ до 2,90 еВ при початковому збільшенні заміщення, а потім зменшується до 2,53 еВ при подальшому підвищенні концентрації алюмінію.

[1] доктор хімічних наук, професор,
професор кафедри неорганічної хімії
(Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ)
e-mail: snedilko@ukr.net
ORCID: 0000-0001-8946-7915
[2] аспірант кафедри неорганічної хімії
(Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ)
e-mail: ivanov@knu.ua
ORCID: 0009-0009-4476-409X

SEM дослідження підтвердило високу пористість та розвинену площу поверхні синтезованих зразків, що є важливою характеристикою для можливого застосування цих матеріалів у різних галузях, включно з каталізом та сенсорами.

Ключові слова: *шпінелі, золь-гель метод, алюмінієве заміщення, ширина забороненої зони, кристалічна структура.*

SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF ALUMINUM-SUBSTITUTED SPINELS BASED ON $ZNMN_2O_4$: STRUCTURE, PROPERTIES, AND APPLICATION PROSPECTS

S. A. Nedilko, O. V. Ivanov

Spinels are important functional materials that are actively researched due to their promising properties in various fields such as catalysis, sensors, and batteries. Aluminum-substituted spinels based on $ZnMn_2O_4$ may exhibit enhanced properties compared to other materials in this class, thanks to their stability, broad tunability of the bandgap, and high porosity. The relevance of this work is underscored by the necessity to search for new materials with controllable properties for use in high-tech industries, particularly in energy applications, to adapt catalysts to modified substrates.
This article presents the results of the synthesis and comprehensive study of the properties of aluminum-substituted spinels with the composition $Zn_{(1-x)}Al_xMn_2O_4$ (x = 0,05, 0,10, 0,15, 0,20, 0,25, 0,30) synthesized using the sol-gel method. For structural characterization and phase composition determination, X-ray diffraction (XRD), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), diffuse reflectance spectroscopy (DRS), and scanning electron microscopy (SEM) methods were employed.
The size of the diffracting crystallites was estimated using the Scherrer equation. X-ray phase analysis confirmed the single-phase nature of all samples regardless of the substitution level, indicating the stability of the obtained structures. Structural refinement was conducted using the Rietveld method, demonstrating a high correspondence between experimental diffractograms and theoretical models. The main parameters of the unit cell and the X-ray density were established, and changes in the metal-oxide distances in the coordination polyhedra were analyzed.
FTIR spectroscopy revealed the presence of three absorption bands in the range of 1000 to 385 cm^{-1} for both reference and substituted samples, with a gradual shift to the long-wavelength region. Bandgap, calculated using the Kubelka-Munk function and Tauc's graphical method, changes from 2.76 eV to 2.90 eV with initial increases in substitution, then decreases to 2.53 eV with further increases in aluminum concentration.
SEM studies confirmed the high porosity and developed surface area of the synthesized samples, which is a crucial characteristic for potential applications of these materials in various fields, including catalysis and sensors.

Key words: *spinels, sol-gel method, aluminum substitution, bandgap, crystal structure.*

Вступ

Шпінелі, які мають загальну хімічну формулу AB_2O_4, є важливим класом складних оксидів, що демонструють значну наукову та практичну цінність завдяки своїм різноманітним функціональним властивостям. Складні оксиди перехідних металів зі структурою шпінелі привернули підвищену увагу через свої каталітичні (Valadi & Gholami, 2021) та фотокаталітичні властивості, які роблять їх перспективними для екологічно чистого розщеплення води та деградації органічних забруднювачів під впливом видимого світла (Fierro et al., 2005; Xu et al., 2009; Ding et al., 2009; Cui et al., 2009). Фотокаталітична активність шпінелей визначається їх здатністю генерувати електрон-діркові пари, що дозволяє ефективно взаємодіяти з різними хімічними сполуками.

Крім фотокаталізу, шпінелі є перспективними матеріалами для електрохімічних систем. Завдяки своїй високій електропровідності та стабільності, оксиди зі структурою шпінелі демонструють чудові електрохімічні властивості, що робить їх потенційними кандидатами для застосування в літій-іонних батареях (Yang et al., 2008; Tian & Yuan, 2009; Chen et al., 2010). Високий потенціал інтеркалюючих процесів, разом зі стабільністю структури під час циклічних процесів зарядки-розрядки, забезпечує шпінелям переваги перед іншими матеріалами.

Окрім того, шпінелі демонструють магнітні властивості, які роблять їх цікавими для практичних застосувань (Chen & Sorensen, 1996; Blanco-Gutiérrez et al., 2010). Магнітні наночастинки на основі шпінелей

мають потенціал для використання в біомедичних застосуваннях, таких як магнітна гіпертермія та магнітно-резонансна томографія (Fan et al., 2009), що підсилює інтерес до їх дослідження та вдосконалення.

Таким чином, багатофункціональні шпінелі представляють надзвичайно перспективні матеріали для фотокаталітичних, електрохімічних і магнітних технологій, що підкреслює їх важливу роль у розвитку новітніх наноматеріалів і функціональних систем.

$ZnMn_2O_4$, як представник класу складних оксидів перехідних металів зі структурою шпінелі, викликає значний інтерес в науковій спільноті через свої унікальні функціональні характеристики. Особливістю цього матеріалу є його здатність демонструвати негативний температурний коефіцієнт опору, що відкриває нові можливості для застосування в електронних компонентах, таких як термосенсори та елементи, чутливі до температури. Ця властивість робить $ZnMn_2O_4$ привабливим кандидатом для інтеграції в новітні технології, пов'язані з терморегуляцією та охороною навколишнього середовища (Guillemet-Fritsch et al., 2000).

Крім того, саме $ZnMn_2O_4$ виявляє потужний потенціал у розробці високострумових енергоефективних матеріалів для зберігання електричної енергії. У контексті сучасних досліджень, акцент робиться на оптимізації конструкцій і складів, що дозволяє покращити характеристику акумуляторів, підвищуючи їх енергетичну щільність та довговічність (Yang et al., 2008).

Фізичні та хімічні властивості наноматеріалів значною мірою залежать від розмірів частинок та їх морфології. Дослідження наноструктур, зокрема одновимірних (1D) форм, таких як нанопроводи та нанотрубки (Selim et al., 2010; Raj et al., 2024; Almojil et al., 2024), вказує на їхній потенціал у поліпшенні фізичних властивостей матеріалів. Одновимірні наноструктури здатні виявляти аномальні електричні та механічні властивості, які суттєво відрізняються від властивостей матеріалів у мікро- та макромасштабах (Barth et al., 2010; Heiba et al., 2024). Вони демонструють значний вплив на теплопровідність, механічну міцність та оптичні характеристики (Wang, 2000; Xia et al., 2003).

Шпінелі на основі $ZnMn_2O_4$ можуть діяти як високоактивні каталізатори, здатні ініціювати реакції окиснення та деградації забруднюючих речовин (Shi et al., 2010; Shang et al., 2023; Almenia et al., 2023; Raj et al., 2024), що робить їх перспективними для екологічних технологій. Поряд із цим, їх застосування в сонячних батареях забезпечує підвищення ефективності перетворення сонячної енергії завдяки оптимізації процесів переносу зарядів і зменшенню втрат енергії (Kronik & Shapira, 1999; Yu et al., 2009).

Частинки $ZnMn_2O_4$ можуть бути синтезовані з використанням різноманітних методів, кожен з яких має свої особливості та переваги. Серед основних підходів виділяються прямий твердофазний синтез, що включає безпосереднє змішування і подальше спікання вихідних компонентів (Bessekhouad & Trari, 2002; Peiteado et al., 2007). Іншим значущим методом є золь-гель метод, який дозволяє отримати нанооб'єкти через послідовний процес гелеутворення і подальшого спалювання (Self-propagating high-temperature synthesis (SHS) (Peng & Wu, 2009). Також часто застосовується ко-преципітація, що забезпечує одержання однорідних наночастинок шляхом спільного випадання компонентів з розчину (Bessekhouad & Trari, 2002). Гідротермальний метод, що включає реакції в присутності рідини під тиском і при підвищеній температурі, демонструє високу ефективність у синтезі наночастинок (Zhang et al., 2007; Xiao et al., 2009). Кожен з цих методів відкриває можливості для контролю над морфологією та розмірами частинок, що, в свою чергу, впливає на їхні подальші фізичні та хімічні властивості.

Заміщення алюмінієм в структурі шпінелевих оксидів, таких як $ZnMn_2O_4$, є важливим напрямком досліджень, яке може суттєво впливати на фізичні та хімічні властивості матеріалу. Введення алюмінію в структуру шпінелей може підвищити хімічну стабільність матеріалів, тому що він сам формує складні оксиди зі структурою шпінелі складу $Me(II)Al_2O_4$ і знаходиться в октаедричних позиціях. Це є критично важливим для застосувань, які потребують високої надійності при довготривалому застосуванні. Алюміній є доступним і екологічно чистим елементом, що робить його привабливим для застосування в технологіях, що потребують оптимізації ресурсів, оскільки може значно знижувати витрати на виробництво та утилізацію.

Отже, $ZnMn_2O_4$ є багатообіцяючим матеріалом, який, завдяки своїй структурі та специфічним властивостям, надає широкі можливості для використання в інновацій-

них технологіях, що стосуються енергетики, екології та електроніки.

Матеріал і методи

Для синтезу шпінелей було обрано зольгель метод, оскільки він забезпечує отримання шихти високої гомогенності. Ця методика дозволяє проводити синтез при нижчих температурах у порівнянні з класичним твердофазним методом, що сприяє формуванню нанокристалітів. Для синтезу було використано розчини $Zn(NO_3)_2$ (0,97C), $Mn(NO_3)_2$ (1,12C) та $Al(NO_3)_3$ (0,54C). Кількість лимонної кислоти розраховано за співвідношенням 1 моль кислоти на 1 моль загальної кількості катіонів металів.

Розраунок кількостей речовин для приготування прекурсорів було проведено на 5 г кінцевого зразка (табл. 1).

Відміряні кількості прекурсорів були перенесені в термостійкий скляний стакан об'ємом 500 мл, після чого об'єм розчину довели до 200 мл. Суміш нагрівали на плитці з магнітним перемішувачем до повного розчинення лимонної кислоти. Надалі отриманий розчин було перелито у скловуглецевий конус №3 для подальшого упарювання. У процесі упарювання розчин поступово ставав більш в'язким. Після висушування температуру підвищили до 300 °C для здійснення процесу горіння.

Отриману шихту подрібнили у ступці та помістили в піч, де проводили випалювання органічної складової при температурі 400 °C протягом 5 годин. Подальший відпал синтезованого та прожареного прекурсору здійснювали при 600 °C протягом 5 годин з доступом повітря.

Для комплексного дослідження структурних властивостей синтезованих матеріалів, а також для визначення їх фазового складу, було використано сучасні аналітичні методи. Зокрема, застосовували рентгенівську дифрактометрію (XRD) для вивчення кристалічної структури й ідентифікації фаз. Інфрачервона спектроскопія з використанням перетворення Фур'є (FTIR) дозволила отримати додаткову інформацію про будову координаційних поліедрів. Спектроскопія дифузного відбиття (DRS) була застосована для дослідження оптичних властивостей, зокрема для визначення енергетичної ширини забороненої зони та оцінки можливостей матеріалів у фотокаталітичних або інших оптоелектронних застосуваннях. Для вивчення морфології поверхні та топографії зразків було використано скануючу електронну мікроскопію (SEM), яка забезпечила високоточні зображення мікроструктури, дозволяючи оцінити розмір, форму і розподіл частинок у матеріалі. Поєднання цих методів дозволяє отримати детальну характеристику матеріалів, що важливо для подальшого вдосконалення синтезу та оптимізації властивостей для конкретних застосувань.

Таблиця 1

Об'єми вихідних розчинів для приготування прекурсорів

	V $Zn(NO_3)_2$, мл	**V $Mn(NO_3)_2$, мл**	**V $Al(NO_3)_3$, мл**	**m (Лим. кис.), г**
$ZnMn_2O_4$	21,54	37,32	-	13,23
$Zn_{0.95}Al_{0.05}Mn_2O_4$	20,63	37,62	1,97	13,34
$Zn_{0.90}Al_{0.10}Mn_2O_4$	19,71	37,93	3,96	13,44
$Zn_{0.85}Al_{0.15}Mn_2O_4$	18,76	38,24	5,99	13,56
$Zn_{0.80}Al_{0.20}Mn_2O_4$	17,81	38,56	8,06	13,67
$Zn_{0.75}Al_{0.25}Mn_2O_4$	16,83	38,88	10,15	13,78
$Zn_{0.70}Al_{0.30}Mn_2O_4$	15,84	39,21	12,29	13,90

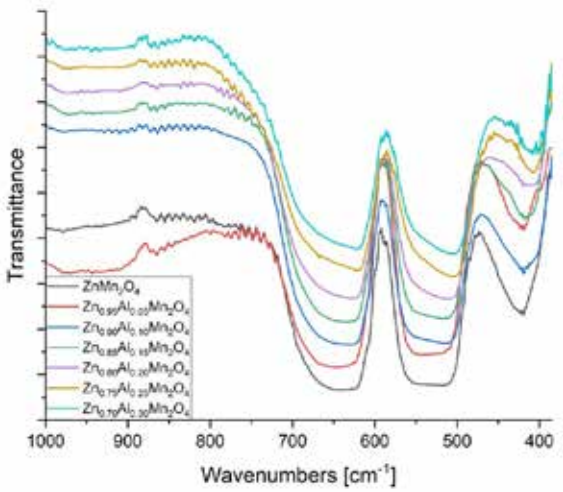


Рис. 1. ІЧ спектри досліджуваних шпінелей

Результати та обговорення

ІЧ спектроскопія. Зйомка проводилась на Perkin Elmer SPECTRUM BX FT-IR в діапазоні 1000–385 $см^{-1}$ з кроком 0,2 $см^{-1}$ за кімнатної температури в спектрально чистому KBr. На графіку представлені ІЧ спектри для чистої $ZnMn_2O_4$ та заміщених зразків (рис. 1).

В діапазоні 400–700 $см^{-1}$ спостерігається три смуги поглинання, які відповідають поглинанню зв'язків Ме-О T_d та Ме-О O_h (Patra et al., 2019). Ці піки пов'язані з коливаннями зв'язків метал-оксид і відображають специфічні структурні особливості матеріалу. Конкретна кількість і інтенсивність піків можуть змінюватися в залежності від умов синтезу, якості зразка та наявності домішок. При збільшені ступеня заміщення (від 0 до 0,30), спостерігається поступовий зсув максимумів смуг поглинання в більш довгохвильову область 638 $см^{-1}$ – 620 $см^{-1}$; 530 $см^{-1}$ – 505 $см^{-1}$; 420 $см^{-1}$ – 404 $см^{-1}$, що може бути пов'язано зі зменшенням середнього ступеня окиснення Mn.

Рентгенофазовий аналіз. Для фазового та структурного аналізу використовувався рентгенівський дифрактометр Shimadzu XRD-6000. Дані отримані з використанням гальмівного випромінювання Cu K_α (λ_{Cu} = 1.54056 Å) за напруги 35 кВ та сили струму 30 мА, 2θ = 5–70°, кроком 0,02° та витримкою 1 с/точку. Ідентифікацію фаз отриманих зразків проведено за допомогою програми Match! 3.0, обробку дифрактограм проведено методом Рітвельда за допомогою пакету програм FullProf Suite. Розрахунок розмірів дифрагуючих кристалітів було проведено за формулою Шерера.

Отримані фази ідентифіковано як гетероліт (COD 96-901-2843). На рис. 2 показано результати уточнення структури за методом Рітвельда. Процес уточнення полягає в мінімізації відмінностей дифракційної картини між відзнятими дифрактограмами серії та розрахованими програмним методом. Сумарні результати обробки дифрактограм наведено в табл. 2.

Малі значення параметру x^2 (1,35–1,96) та R фактори вказують на високий рівень співпадіння експериментальних даних та розрахованих шаблонів для (I41/amd) тетрагональної системи.

Проаналізувавши динаміку зміни відстані Ме – О в екваторіальних та аксіальних положеннях октаедричних координаційних поліедрів, можна зробити висновок, що вона зменшується зі збільшенням рівня заміщення. При цьому спостерігається поступове зменшення дисторсії поліедрів.

Спектроскопія дифузного відбиття (UV-VIS-NIR). Проведена спектроскопія дифузного відбиття для серії зразків x = 0 – 0,30. Зйомка проводилась на спектрофотометрі Shimadzu UV 2600i в діапазоні довжин хвиль від 200 нм (UV) до 1400 нм (NIR) з кроком 1 нм. В якості джерел випромінювання використовувались дейтерієва лампа SPD-M20A 20 Вт (200–400 нм) та вольфрамово-галогенова лампа 60 Вт (400–1400 нм). В якості еталону порівняння використовувався спектрально чистий $BaSO_4$. Загальний погляд на спектри (рис. 3) серії, що зі збільшенням ступеню заміщення, зростає рівень відбиття на всьому діапазоні досліджуваного спектру.

Спостерігається різке збільшення відбиття усієї серії зразків від 400 нм до 1400 нм, тому зразки мають коричневий колір. Для опису порошків було використано функцію Кубелки-Мунка. Значення ширини забороненої зони (ШЗЗ) визначали методом Тауца. Результати наведено в табл. 3.

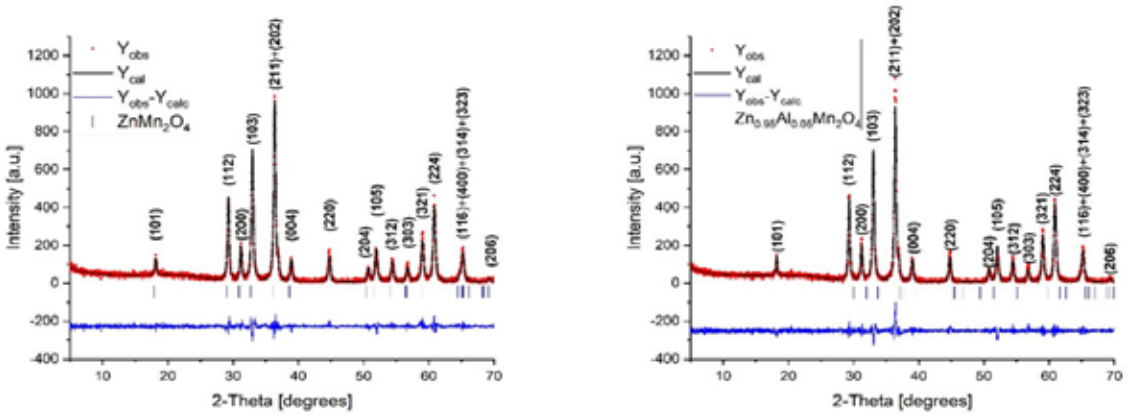


Рис. 2. Графічне відображення результатів уточнення методом Рітвельда

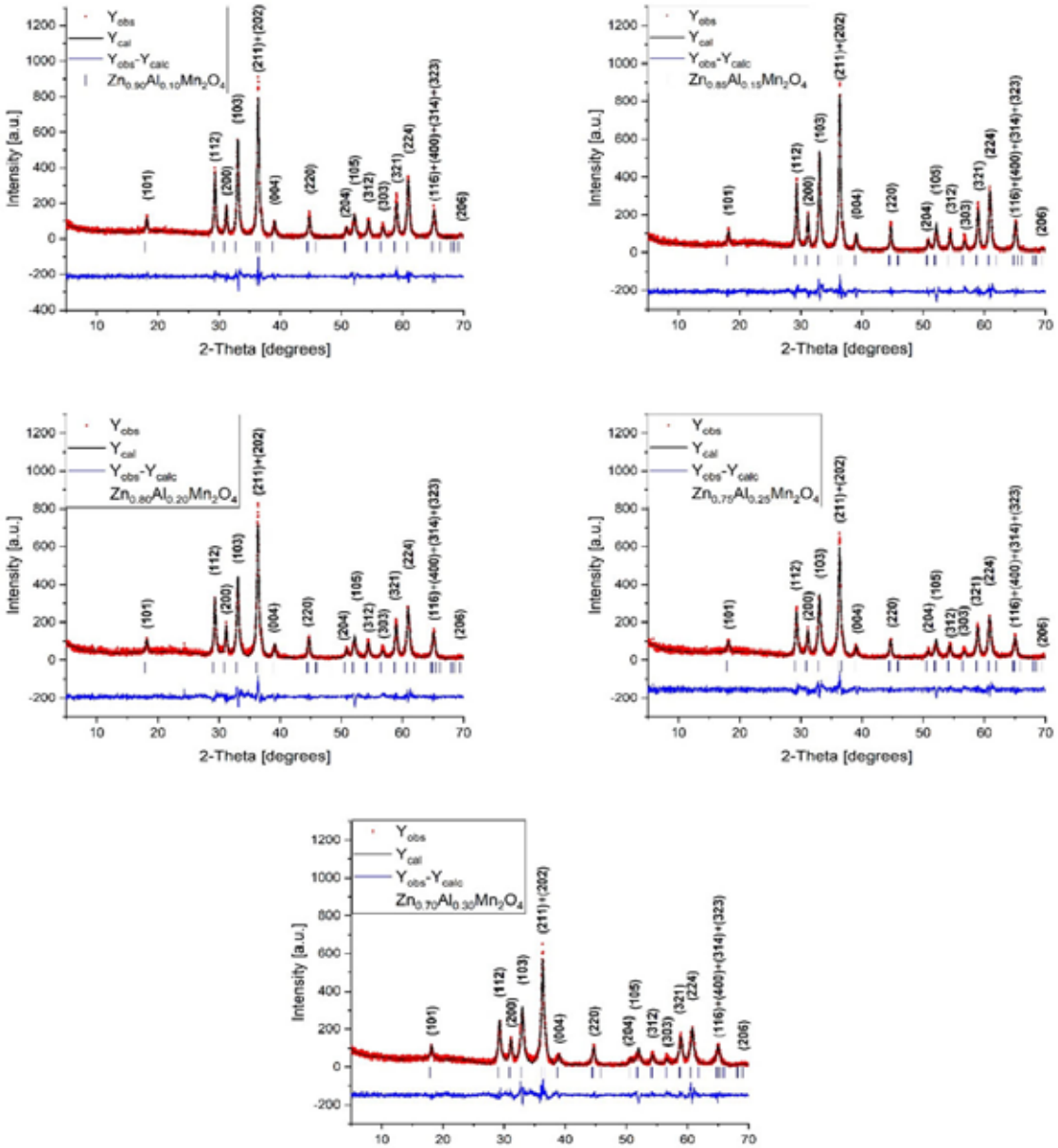


Рис. 2. Графічне відображення результатів уточнення методом Рітвельда

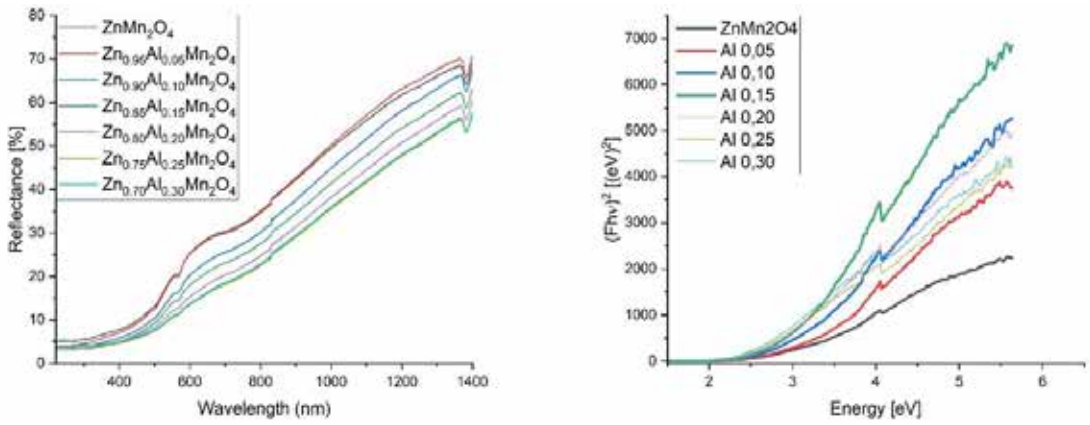


Рис. 3. Спектри дифузного відбиття серії зразків та результати обробки їх за допомогою функції Кубелки-Мунка

Таблиця 2

R фактори та кристалографічні параметри досліджуваних зразків

	$ZnMn_2O_4$	**$Zn_{0.95}Al_{0.05}Mn_2O_4$**	**$Zn_{0.90}Al_{0.10}Mn_2O_4$**	**$Zn_{0.85}Al_{0.15}Mn_2O_4$**	**$Zn_{0.80}Al_{0.20}Mn_2O_4$**	**$Zn_{0.75}Al_{0.25}Mn_2O_4$**	**$Zn_{0.70}Al_{0.30}Mn_2O_4$**
Просторова група	**I41/amd (141) – tetragonal**						
Параметри комірки	a=5,7100 **Å** c=9,2243 **Å**	a=5,7271(2) **Å** c=9,2346(5) **Å**	a=5,7115(2) **Å** c=9,1875(6) **Å**	a=5,7148(2) **Å** c=9,1872(6) **Å**	a=5,7173(3) **Å** c=9,1833(7) **Å**	a=5,7206(3) **Å** c=9,1914(8) **Å**	a=5,7270 **Å** c=9,2205 **Å**
	c/a=1,6155	c/a=1,6124	c/a=1,6086	c/a=1,6076	c/a=1,6062	c/a=1,6067	c/a=1,6100
	V=300,75**Å³**	V=302,89(2)**Å³**	V=299,71(2)**Å³**	V=300,04(2)**Å³**	V=300,18(3)**Å³**	V=300,79(3)**Å³**	V=302,42 **Å³**
Розрахункова густина, [г/см³]	5,290	5,248	5,205	5,163	5,120	5,078	5,036
Мінімальний розмір дифрагуючих кристалітів, [нм]	25	31	28	30	26	22	21
Брегівський R-фактор, R_B (%)	4,44	4,45	4,13	4,57	5,50	6,33	6,74
R_F-фактор, R_F (%)	4,62	4,33	4,78	4,68	5,85	6,50	5,95
Профільне значення R, R_P (%)	10.3	11,4	11,5	12,2	12,6	12,7	14,3
Зважене профільне значення R, R_{wp} (%)	14,8	15,6	16,1	17,0	17,2	17,3	19,0
Xi квадрат, x^2 (%)	1,35	1,46	1,54	1,71	1,71	1,61	1,96
Очікуване значення R, R_{exp} (%)	12,73	12,94	13,02	12,96	13,15	13,65	13,58
O_e, [Å]	1,9456	1,9162	1,9359	1,9083	1,9146	1,9071	1,9078
O_a, [Å]	2,2532	2,2403	2,2576	2,2213	2,2006	2,1884	2,1809
Викривлення O_h, 10^{-4}	56,155	56,996	55,088	53,729	45,044	43,912	41,472
T_d, [Å]	1,9508	2,011	1,9541	2,0142	2,0209	2,043	2,0589
Викривлення T_d, 10^{-4}	0,001	0	0,001	-0,001	-0,001	0	0

Таблиця 3

Залежність ШЗЗ від ступеню заміщення (x)

x, %	0	5	10	15	20	25	30
ШЗЗ, еВ	2,76	2,81	2,84	2,90	2,64	2,53	2,59

Динаміка зміни ШЗЗ у серії зразків може вказувати на утворення домішкової фази (починаючи з x = 0,15 – 0,20), яка не фіксується на рентгенофазовому аналізі через незначний вміст та має меншу ШЗЗ або призводить до появи додаткових енергетичних рівнів.

Скануюча електронна мікроскопія. Загальна морфологія зразків була оцінена за допомогою скануючої електронної мікроскопії (СЕМ) (рис. 4). Можна бачити, що зразки мають аморфну структуру, дуже високу пористість та питому площу поверхні. Ці властивості є дуже важливими для використання матеріалів в каталізі та літій-іонних акумуляторах, оскільки забезпечує високу площу контакту та мінімальну зміну гравіметричної густини матеріалу при зміні температури та інтеркаляції літію в матрицю.

Висновки

Проведені експериментальні дослідження показали, що часткове заміщення цинку на алюміній у структурі $Zn_{(1-x)}Al_xMn_2O_4$ не призводить до руйнування кристалічної ґратки шпінелі. Це свідчить про можливість утворення стабільних твердих розчинів заміщення в досліджуваній системі. Заміщення до 30% Zn на Al не лише зберігає шпінельну структуру, але й сприяє поступовим змінам параметрів кристалічної ґратки, що дозволяє контролювати фізико-хімічні властивості матеріалу.

Такі зміни у структурі відкривають нові можливості для програмованого синтезу матеріалів з бажаними характеристиками. Це є надзвичайно важливим, оскільки дозволяє оптимізувати матеріали для специфічних застосувань, таких як каталіз або

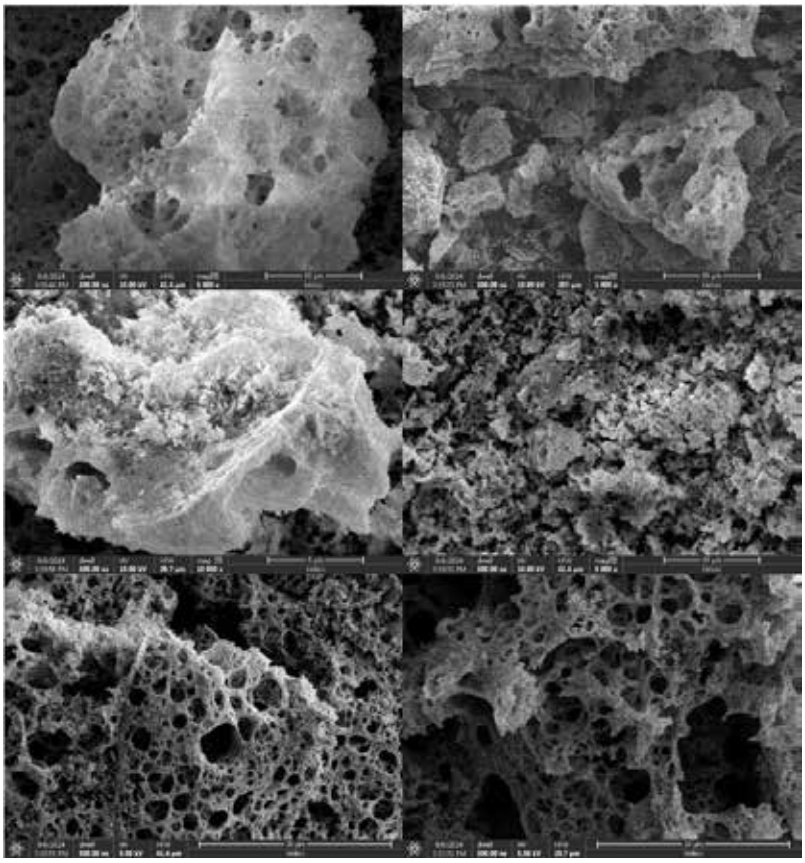


Рис. 4. SEM $Zn_{0.95}Al_{0.5}Mn_2O_4$ (*верхній ряд*), $Zn_{0.95}Al_{0.5}Mn_2O_4$ (*середній ряд*), $Zn_{0.95}Al_{0.5}Mn_2O_4$ (*нижній ряд*)

використання в енергоємких акумуляторах. Плавне корегування морфології та інших характеристик завдяки керованому заміщенню робить ці матеріали перспективними для створення ефективних каталітичних систем і електродів, здатних накопичувати та зберігати енергію з високою ефективністю.

Список використаної літератури

Almenia S.H., Ismail A.A., Alzahrani K.A., Aljahdali M. Design of mesoporous heterojunction $CuCo_2O_4/Co_3O_4$ photocatalyst with superior photocatalytic degradation of tetracycline. *Journal of Photochemistry and Photobiology A.* 2023. Vol. 438. P. 114507. https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2022.114507.

Almojil S.F., Ali M.A., Almohana A.I., Alali A.F., Almoalimi K.T., Althahban S., Sharma K., Ahmed A.N. Constructing a $ZnO/CuCo_2O_4$ p-n heterojunction photocatalyst for efficiently hexavalent chromium–phenol detoxification and nitrogen fixation. *Journal of Physics and Chemistry of Solids.* 2023. Vol. 172. P. 111057. https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2022.111057.

Barth S., Hernandez-Ramirez F., Holmes J.D., Romano-Rodriguez A. Synthesis and applications of one-dimensional semiconductors. *Progress in Materials Science.* 2010. Vol. 55. P. 563–627. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2010.02.001.

Bessekhouad Y., Trari M. Photocatalytic hydrogen production from suspension of spinel powders AMn_2O_4 (A = Cu and Zn). *International Journal of Hydrogen Energy.* 2002. Vol. 27. P. 357–362. https://doi.org/10.1016/s0360-3199(01)00159-8.

Blanco-Gutiérrez V., Torralvo-Fernández M.J., Sáez-Puche R. Magnetic behavior of $ZnFe_2O_4$ nanoparticles: Effects of a solid matrix and the particle size. *Journal of Physical Chemistry C.* 2010. Vol. 114. P. 1789–1795. https://doi.org/10.1016/s0360-3199(01)00159-8.

Chen J.P., Sorensen C.M. Size-dependent magnetic properties of $MnFe_2O_4$ fine particles synthesized by coprecipitation. *Physical Review B.* 1996. Vol. 54. P. 9288–9296. https://doi.org/10.1103/physrevb.54.9288.

Chen Y.C., Xie K., Pan Y., Zheng C.M. Effect of calcination temperature on the electrochemical performance of nanocrystalline $LiMn_2O_4$ prepared by a modified resorcinol-formaldehyde route. *Solid State Ionics.* 2010. Vol. 181. P. 1445–1450. https://doi.org/10.1016/j.ssi.2010.08.011.

Cui B., Lin H., Liu Y.Z., Li J.B., Sun P., Zhao X.C., Liu C.J. Photophysical and photocatalytic properties of core-ring structured $NiCo_2O_4$ nanoplatelets. *Journal of Physical Chemistry C.* 2009. Vol. 113. P. 14083–14087. https://doi.org/10.1021/jp900028t.

Ding D.W., Long M., Cai W.M., Wu Y.H., Wu D.Y., Chen C. In situ synthesis of photocatalytic $CuAl_2O_4$-Cu hybrid nanorod arrays. *Chemical Communications.* 2009. Vol. 24. P. 3588–3590. https://doi.org/10.1039/B903865E.

Fan H.M., Yi J.B., Yang Y., Kho K.W., Tan H.R., Shen Z.X., Ding J., Sun X.W., Olivo M.C., Feng Y.P. Single-crystalline MFe_2O_4 nanotubes/nanorings synthesized by thermal transformation process for biological applications. *ACS Nano.* 2009. Vol. 3. P. 2798–2808. https://doi.org/10.1021/nn9006797.

Ferraris G., Fierro G., Jacono M.L., Inversi M., Dragone R. A study of the catalytic activity of cobalt-zinc manganites for the reduction of NO by hydrocarbons. *Applied Catalysis B: Environmental.* 2002. Vol. 36. P. 251–260. https://doi.org/10.1016/S0926-3373(01)00289-2.

Fierro G., Jacono M.L., Dragone R., Ferraris G., Andreozzi G.B., Graziani G. Fe-Zn manganite spinels and their carbonate precursors: Preparation, characterization and catalytic activity. *Applied Catalysis B: Environmental.* 2005. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2004.10.007.

Guillemet-Fritsch S., Chanel C., Sarrias J., Bayonne S., Rousset A., Alcobe X., Martinez Sarriòn M.L. Structure, thermal stability and electrical properties of zinc manganites. *Solid State Ionics.* 2000. Vol. 128. P. 233–242. https://doi.org/10.1016/S0167-2738(99)00340-9.

Heiba Z.K., Ghannam M.M., Abdellatief M., Badawi A., Mohamed M.B. Structural, optical and shielding properties of transition metals (R: Mg, Sn and Bi) doped nano $ZnMn_2O_4$: A comparative study. *Optical Materials.* 2024. Vol. 152. P. 115511. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115511.

Kronik L., Shapira Y. Surface photovoltage phenomena: Theory, experiment, and applications. *Surface Science Reports.* 1999. Vol. 37. P. 1–206. https://doi.org/10.1016/S0167-5729(99)00002-3.

Patra P., Naik I., Bhatt H., Kaushik S.D. Structural, infrared spectroscopy and magnetic properties of spinel $ZnMn_2O_4$. *Physica B: Condensed Matter.* 2019. https://doi.org/10.1016/j.physb.2019.08.005.

Peiteado M., Caballero A.C., Makovec D. Diffusion and reactivity of ZnO-MnOx system. *Journal of Solid State Chemistry*. 2007. Vol. 180. P. 2459–2464. https://doi.org/10.1016/j.jssc.2007.07.001.

Peng H.Y., Wu T. Nonvolatile resistive switching in spinel $ZnMn_2O_4$ and ilmenite $ZnMnO_3$. *Applied Physics Letters*. 2009. Vol. 95. P. 152106. https://doi.org/10.1063/1.3249630.

Raj S., Manna R., Samanta A.N. Spinel $ZnMn_2O_4$ nanosphere for the efficient sulfamethazine degradation under visible light irradiation and photoelectrochemical study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2024. Vol. 12. P. 112277. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112277.

Selim M.M., Deraz N.M., Elshafey O.I., El-Asmy A.A. Synthesis, characterization and physicochemical properties of nanosized Zn/Mn oxides system. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010. Vol. 506. P. 541–547. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.04.180.

Shang J., Zhang T., Li X., Luo Y., Feng D., Cheng X. Mn_3O_4-$ZnMn_2O_4$/SnO_2 nanocomposite activated peroxymonosulfate for efficient degradation of ciprofloxacin in water. *Separation and Purification Technology*. 2023. Vol. 311. P. 123342. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105533.

Shi R., Wang Y.J., Li D., Xu J., Zhu Y.F. Synthesis of $ZnWO_4$ nanorods with [100] orientation and enhanced photocatalytic properties. *Applied Catalysis B: Environmental.* 2010. Vol. 100. P. 173–178. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2010.07.027.

Tian L., Yuan A.B. Electrochemical performance of nanostructured spinel $LiMn_2O_4$ in different aqueous electrolytes. *Journal of Power Sources.* 2009. Vol. 192. P. 693–697. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.03.002.

Valadi F.M., Gholami M.R. Synthesis of $CuCo_2O_4$/$BiVO_4$ composites as promising and efficient catalysts for 4-nitrophenol reduction in water: Experimental and theoretical study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Vol. 9. P. 105408. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105408.

Wang Z.L. Characterizing the structure and properties of individual wirelike nanoentities. *Advanced Materials.* 2000. Vol. 12. P. 1295–1298. https://doi.org/10.1002/1521-4095(200009)12:17<1295::AID-DMA1295>3.0.CO;2-B.

Xia Y.N., Yang P.D., Sun Y.G., Wu Y.Y., Mayers B., Gates B., Yin Y.D., Kim F., Yan H.Q. One-dimensional nanostructures: Synthesis, characterization, and applications. *Advanced Materials*. 2003. Vol. 15. P. 353–389. https://doi.org/10.1002/adma.200390087.

Xiao L.F., Yang Y.Y., Yin J., Li Q., Zhang L.Z. Low temperature synthesis of flower-like $ZnMn_2O_4$ superstructures with enhanced electrochemical lithium storage. *Journal of Power Sources*. 2009. Vol. 194. P. 1089–1093. https://doi.org/10.1039/C3TA13511J.

Xu S.H., Feng D.L., Shangguan W.F. Preparations and photocatalytic properties of visible-light-active zinc ferrite-doped TiO_2 photocatalyst. *Journal of Physical Chemistry C.* 2009. Vol. 113. P. 463–467. https://doi.org/10.1021/jp806704y.

Yang Y.Y., Zhao Y.Q., Xiao L.F., Zhang L.Z. Nanocrystalline $ZnMn_2O_4$ as a novel lithium-storage material. *Electrochemical Communications.* 2008. Vol. 10. P. 1117–1120. https://doi.org/10.1016/j.elecom.2008.05.026.

Yu K.H., Chen J.H. Enhancing solar cell efficiencies through 1-D nanostructures. Nanoscale Research Letters. 2009. Vol. 4. P. 1–10. https://doi.org/10.1007/s11671-008-9200-y.

Zhang X.D., Wu S.Z., Zang J., Li D., Zhang Z.D. Hydrothermal synthesis and characterization of nanocrystalline Zn-Mn spinel. *Journal of Physics and Chemistry of Solids.* 2007. Vol. 68. P. 1583–1590. https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2007.03.044.

References

Almenia, S.H., Ismail, A.A., Alzahrani, K.A., & Aljahdali, M. (2023). Design of mesoporous heterojunction $CuCo_2O_4$/Co_3O_4 photocatalyst with superior photocatalytic degradation of tetracycline. *Journal of Photochemistry and Photobiology A*, 438, 114507. https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2022.114507 [in English].

Almojil, S.F., Ali, M.A., Almohana, A.I., Alali, A.F., Almoalimi, K.T., Althahban, S., Sharma, K., & Ahmed, A.N. (2023). Constructing a ZnO/$CuCo_2O_4$ p-n heterojunction photocatalyst for efficiently hexavalent chromium–phenol detoxification and nitrogen fixation. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 172, 111057. https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2022.111057 [in English].

Barth, S., Hernandez-Ramirez, F., Holmes, J.D., & Romano-Rodriguez, A. (2010). Synthesis and applications of one-dimensional semiconductors. *Progress in Materials Science*, 55, 563–627. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2010.02.001 [in English].

Bessekhouad, Y., & Trari, M. (2002). Photocatalytic hydrogen production from suspension of spinel powders AMn_2O_4 (A = Cu and Zn). *International Journal of Hydrogen Energy*, 27, 357–362. https://doi.org/10.1016/s0360-3199(01)00159-8 [in English].

Blanco-Gutiérrez, V., Torralvo-Fernández, M.J., & Sáez-Puche, R. (2010). Magnetic behavior of $ZnFe_2O_4$ nanoparticles: Effects of a solid matrix and the particle size. *Journal of Physical Chemistry C*, 114, 1789–1795. https://doi.org/10.1016/s0360-3199(01)00159-8 [in English].

Chen, J.P., & Sorensen, C.M. (1996). Size-dependent magnetic properties of $MnFe_2O_4$ fine particles synthesized by coprecipitation. *Physical Review B*, 54, 9288–9296. https://doi.org/10.1103/physrevb.54.9288 [in English].

Chen, Y.C., Xie, K., Pan, Y., & Zheng, C.M. (2010). Effect of calcination temperature on the electrochemical performance of nanocrystalline $LiMn_2O_4$ prepared by a modified resorcinol-formaldehyde route. *Solid State Ionics*, 181, 1445–1450. https://doi.org/10.1016/j.ssi.2010.08.011 [in English].

Cui, B., Lin, H., Liu, Y.Z., Li, J.B., Sun, P., Zhao, X.C., & Liu, C.J. (2009). Photophysical and photocatalytic properties of core-ring structured $NiCo_2O_4$ nanoplatelets. *Journal of Physical Chemistry C*, 113, 14083–14087. https://doi.org/10.1021/jp900028t [in English].

Ding, D.W., Long, M., Cai, W.M., Wu, Y.H., Wu, D.Y., & Chen, C. (2009). In situ synthesis of photocatalytic $CuAl_2O_4$-Cu hybrid nanorod arrays. *Chemical Communications*, 24, 3588–3590. https://doi.org/10.1039/B903865E [in English].

Fan, H.M., Yi, J.B., Yang, Y., Kho, K.W., Tan, H.R., Shen, Z.X., Ding, J., Sun, X.W., Olivo, M.C., & Feng, Y.P. (2009). Single-crystalline MFe_2O_4 nanotubes/nanorings synthesized by thermal transformation process for biological applications. *ACS Nano*, 3, 2798–2808. https://doi.org/10.1021/nn9006797 [in English].

Ferraris, G., Fierro, G., Jacono, M.L., Inversi, M., & Dragone, R. (2002). A study of the catalytic activity of cobalt-zinc manganites for the reduction of NO by hydrocarbons. *Applied Catalysis B: Environmental*, 36, 251–260. https://doi.org/10.1016/S0926-3373(01)00289-2 [in English].

Fierro, G., Jacono, M.L., Dragone, R., Ferraris, G., Andreozzi, G.B., & Graziani, G. (2005). Fe-Zn manganite spinels and their carbonate precursors: Preparation, characterization and catalytic activity. *Applied Catalysis B: Environmental.* https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2004.10.007 [in English].

Guillemet-Fritsch, S., Chanel, C., Sarrias, J., Bayonne, S., Rousset, A., Alcobe, X., & Martinez Sarriòn, M.L. (2000). Structure, thermal stability and electrical properties of zinc manganites. *Solid State Ionics*, 128, 233–242. https://doi.org/10.1016/S0167-2738(99)00340-9 [in English].

Heiba, Z.K., Ghannam, M.M., Abdellatief, M., Badawi, A., & Mohamed, M.B. (2024). Structural, optical and shielding properties of transition metals (R: Mg, Sn and Bi) doped nano $ZnMn_2O_4$: A comparative study. *Optical Materials*, 152, 115511. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115511 [in English].

Kronik, L., & Shapira, Y. (1999). Surface photovoltage phenomena: Theory, experiment, and applications. *Surface Science Reports*, 37, 1–206. https://doi.org/10.1016/S0167-5729(99)00002-3 [in English].

Patra, P., Naik, I., Bhatt, H., & Kaushik, S.D. (2019). Structural, infrared spectroscopy and magnetic properties of spinel $ZnMn_2O_4$. *Physica B: Condensed Matter*. https://doi.org/10.1016/j.physb.2019.08.005 [in English].

Peiteado, M., Caballero, A.C., & Makovec, D. (2007). Diffusion and reactivity of ZnO-MnO_x system. *Journal of Solid State Chemistry*, 180, 2459–2464. https://doi.org/10.1016/j.jssc.2007.07.001 [in English].

Peng, H.Y., & Wu, T. (2009). Nonvolatile resistive switching in spinel $ZnMn_2O_4$ and ilmenite $ZnMnO_3$. *Applied Physics Letters*, 95, 152106. https://doi.org/10.1063/1.3249630 [in English].

Raj, S., Manna, R., & Samanta, A.N. (2024). Spinel $ZnMn_2O_4$ nanosphere for the efficient sulfamethazine degradation under visible light irradiation and photoelectrochemical study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12, 112277. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112277 [in English].

Selim, M.M., Deraz, N.M., Elshafey, O.I., & El-Asmy, A.A. (2010). Synthesis, characterization and physicochemical properties of nanosized Zn/Mn oxides system. *Journal of Alloys and Compounds*, 506, 541–547. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.04.180 [in English].

Shang, J., Zhang, T., Li, X., Luo, Y., Feng, D., & Cheng, X. (2023). Mn3O4-$ZnMn_2O_4/SnO_2$ nanocomposite activated peroxymonosulfate for efficient degradation of ciprofloxacin in water. *Separation and Purification Technology*, 311, 123342. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105533 [in English].

Shi, R., Wang, Y.J., Li, D., Xu, J., & Zhu, Y.F. (2010). Synthesis of $ZnWO_4$ nanorods with [100] orientation and enhanced photocatalytic properties. *Applied Catalysis B: Environmental*, 100, 173–178. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2010.07.027 [in English].

Tian, L., & Yuan, A.B. (2009). Electrochemical performance of nanostructured spinel $LiMn_2O_4$ in different aqueous electrolytes. *Journal of Power Sources*, 192, 693–697. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.03.002 [in English].

Valadi, F.M., & Gholami, M.R. (2021). Synthesis of $CuCo_2O_4/BiVO_4$ composites as promising and efficient catalysts for 4-nitrophenol reduction in water: Experimental and theoretical study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9, 105408. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105408 [in English].

Wang, Z.L. (2000). Characterizing the structure and properties of individual wirelike nanoentities. *Advanced Materials*, 12, 1295–1298. https://doi.org/10.1002/1521-4095(200009)12:17<1295::AID-DMA1295>3.0.CO;2-B [in English].

Xia, Y.N., Yang, P.D., Sun, Y.G., Wu, Y.Y., Mayers, B., Gates, B., Yin, Y.D., Kim, F., & Yan, H.Q. (2003). One-dimensional nanostructures: Synthesis, characterization, and applications. *Advanced Materials*, 15, 353–389. https://doi.org/10.1002/adma.200390087 [in English].

Xiao, L.F., Yang, Y.Y., Yin, J., Li, Q., & Zhang, L.Z. (2009). Low temperature synthesis of flower-like $ZnMn_2O_4$ superstructures with enhanced electrochemical lithium storage. *Journal of Power Sources*, 194, 1089–1093. https://doi.org/10.1039/C3TA13511J [in English].

Xu, S.H., Feng, D.L., & Shangguan, W.F. (2009). Preparations and photocatalytic properties of visible-light-active zinc ferrite-doped TiO_2 photocatalyst. *Journal of Physical Chemistry C*, 113, 463–467. https://doi.org/10.1021/jp806704y [in English].

Yang, Y.Y., Zhao, Y.Q., Xiao, L.F., & Zhang, L.Z. (2008). Nanocrystalline $ZnMn_2O_4$ as a novel lithium-storage material. *Electrochemical Communications*, 10, 1117–1120. https://doi.org/10.1016/j.elecom.2008.05.026 [in English].

Yu, K.H., & Chen, J.H. (2009). Enhancing solar cell efficiencies through 1-D nanostructures. *Nanoscale Research Letters*, 4, 1–10. https://doi.org/10.1007/s11671-008-9200-y [in English].

Zhang, X.D., Wu, S.Z., Zang, J., Li, D., & Zhang, Z.D. (2007). Hydrothermal synthesis and characterization of nanocrystalline Zn-Mn spinel. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 68, 1583–1590. https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2007.03.044 [in English].

Отримано: 22.10.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

АГРОНОМІЯ

УДК 635.21:361.523
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.10

СПОСОБИ КУЛЬТИВУВАННЯ НАСІННЄВОГО МАТЕРІАЛУ КАРТОПЛІ, ОТРИМАНОГО В КУЛЬТУРІ МЕРИСТЕМ *IN VITRO*

В. С. Закорко[1], В. М. Коваленко[2]

На сьогодні забезпечення високоякісного насіннєвого матеріалу картоплі є однією з ключових проблем аграрного сектора, оскільки саме оздоровлений насіннєвий фонд визначає врожайність та стійкість до вірусних хвороб. Традиційні методи розмноження часто супроводжуються накопиченням вірусних інфекцій та патогенів, що негативно впливає на продуктивність і якість врожаїв. Це зумовлює необхідність пошуку інноваційних технологій, які можуть забезпечити швидке розмноження картоплі з мінімальними втратами якості та без ризику інфікування. Використання біотехнологічних методів, зокрема мікроклонального розмноження in vitro, стає критично важливим для вирішення цих проблем. Однак, виникають питання щодо підбору оптимальних умов культивування мікробульб та їхньої адаптації до відкритого ґрунту. На цьому етапі актуальним є визначення найефективніших поживних середовищ та регуляторів росту, що впливають на інтенсивність утворення та кількості бульб.

Основним завданням є розробка та оптимізація технологій мікроклонального розмноження картоплі для отримання високоякісного безвірусного посадкового матеріалу. Додатково важливо вирішити проблеми адаптації мінібульб до умов відкритого ґрунту та дослідити способи підвищити показники приживлення на етапі in vitro – ex vitro. Досягнення цих цілей сприятиме підвищенню ефективності сталого агровиробництва та забезпеченню отримання стабільно високих урожаїв картоплі. Розмноження мінібульб у польових умовах є важливим етапом виробництва оздоровленого та високопродуктивного насіннєвого матеріалу картоплі. Виконання агротехнічних заходів у поєднанні з контролем за хворобами дозволяє досягти високої врожайності та покращити якість мінібульб. Цей процес потребує ретельного дотримання технологій, особливо на ранніх етапах росту рослин, щоб уникнути втрат урожаю через хвороби та несприятливі погодні умови.

У перспективі реалізація результатів цього дослідження може сприяти підвищенню конкурентоспроможності агросектору України, покращуючи якість та доступність насіннєвого матеріалу для товаровиробників. З огляду на глобальні виклики, такі як зміни клімату та зростання

[1] аспірант кафедри біотехнології та хімії,
молодший науковий співробітник
(Сумський національний аграрний університет, м. Суми)
e-mail: andb201727@ukr.net
ORCID: 0009-0005-5398-0246
[2] кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри біотехнології та хімії
(Сумський національний аграрний університет, м. Суми)
e-mail: tovagrarne_bz@ukr.net
ORCID: 0000-0002-9830-3370

населення, інноваційні підходи до вирощування картоплі стають особливо важливими для забезпечення продовольчої безпеки.
Важливо дослідити можливість отримання мінібульб з меристемних рослин та мінібульб картоплі під час їх укорінення на етапі in vitro – ex vitro з подальшим збиранням мінібульб та вирощування у відкритому ґрунті. Водночас, передбачається додатковий насіннєвий матеріал з мінібульб після проходження етапу їх пробудження в умовах одного вегетаційного року в умовах закритого ґрунту.

Ключові слова: *гідропоніка, аеропоніка, мінібульби, умови вирощування, біотехнологічні методи, адаптивний потенціал.*

CULTIVATION MEASURES OF POTATO SEED MATERIAL OBTAINED IN MERISTEM CULTURE *IN VITRO*

V. S. Zakorko, V. M. Kovalenko

Today, the provision of high-quality potato seed material is one of the key problems of the agricultural sector, since it is the healthy seed fund that determines the yield and resistance to viral diseases. Traditional breeding methods are often accompanied by the accumulation of viral infections and pathogens, which negatively affects the productivity and quality of crops. This necessitates the search for innovative technologies that can ensure rapid reproduction of potatoes with minimal loss of quality and without the risk of infection. The use of biotechnological methods, in particular microclonal propagation in vitro, becomes critical for solving these problems. However, questions arise regarding the selection of optimal conditions for the cultivation of microtubers and their adaptation to open ground. At this stage, it is important to determine the most effective nutrient media and growth regulators that affect the intensity of formation and the number of tubers.
The main task is the development and optimization of microclonal potato propagation technologies to obtain high-quality virus-free planting material. Additionally, it is important to solve the problems of adaptation of minibulbs to the conditions of the open ground and to investigate ways to increase the germination rates at the in vitro – ex vitro stage. Achieving these goals will contribute to increasing the efficiency of sustainable agricultural production and ensuring consistently high yields of potatoes. Propagation of minitubers in the field is an important stage in the production of healthy and highly productive potato seed material. The implementation of agrotechnical measures in combination with disease control allows to achieve high yields and improve the quality of minibulbs. This process requires careful adherence to technology, especially in the early stages of plant growth, to avoid crop losses due to disease and adverse weather conditions.
In the future, the implementation of the results of this study can contribute to increasing the competitiveness of the agricultural sector of Ukraine, improving the quality and availability of seed material for commodity producers. In view of global challenges such as climate change and population growth, innovative approaches to potato cultivation are becoming especially important to ensure food security.
It is important to investigate the possibility of obtaining minibulbs from meristem plants and potato minibulbs during their rooting at the in vitro – ex vitro stage with subsequent collection of minibulbs and cultivation in open ground. At the same time, additional seed material from mini tubers is expected after passing the stage of their awakening in the conditions of one vegetation year in closed soil conditions.

Key words: *hydroponics, aeroponics, minibulbs, growing conditions, biotechnological methods, adaptive potential.*

Вступ

Сучасне сільське господарство, зокрема виробництво картоплі, вимагає якісного насіннєвого матеріалу для забезпечення стабільної врожайності та стійкості до захворювань. Проте традиційні методи розмноження картоплі мають низку обмежень, серед яких поширення вірусних та бактеріальних інфекцій, що призводить до значних втрат урожаю. Використання ураженого матеріалу впливає на продуктивність культури та потребує додаткових агротехнічних заходів, що підвищує витрати на вирощування (Бондарчук та ін., 2016; Kovalenko et al., 2024).

У відповідь на ці виклики, технології мікроклонального розмноження *in vitro* стають важливим інструментом для отримання безвірусного насіннєвого матеріалу. Цей підхід забезпечує швидке й масове вироб-

ництво генетично однорідних рослин, які зберігають усі ознаки вихідного сорту, що дає можливість реалізувати їх адаптивний потенціал. Проте, залишається актуальним питання оптимізації процесу культивування, щоб підвищити ефективність мікробульбоутворення та адаптації рослин до ґрунтових умов. Також важливо дослідити використання гідропоніки й аеропоніки як способи для масштабного виробництва мінібульб, що можуть служити початковим матеріалом для подальшого розмноження.

Матеріал і методи

На сьогодні забезпечення високоякісного насіннєвого матеріалу картоплі є однією з ключових проблем аграрного сектора, оскільки саме оздоровлений насіннєвий фонд визначає врожайність та стійкість до вірусних хвороб. Традиційні методи розмноження часто супроводжуються накопиченням вірусних інфекцій та патогенів, що негативно впливає на продуктивність і якість врожаїв. Це обумовлює необхідність пошуку інноваційних технологій, які можуть забезпечити швидке розмноження картоплі з мінімальними втратами якості та без ризику інфікування.

Використання біотехнологічних методів, зокрема мікроклонального розмноження *in vitro*, стає критично важливим для вирішення цих проблем. Однак, виникають питання щодо підбору оптимальних умов культивування мікробульб та їхньої адаптації до відкритого ґрунту. На цьому етапі актуальним є визначення найефективніших поживних середовищ та регуляторів росту, що впливають на інтенсивність утворення та кількості бульб.

Основним завданням є розробка та оптимізація технологій мікроклонального розмноження картоплі для отримання високоякісного безвірусного посадкового матеріалу. Додатково важливо вирішити проблеми адаптації мінібульб до умов відкритого ґрунту та дослідити способи підвищити показники приживлення на етапі in vitro – ex vitro. Досягнення цих цілей сприятиме підвищенню ефективності сталого агровиробництва та забезпеченню отримання стабільно високих урожаїв картоплі.

Результати та обговорення

Способи отримання та культивування мінібульб. В останні роки досить широко за відтворення еліти як добазовий насіннєвий матеріал використовуються мінібульби.

Культивування мінібульб картоплі – це ефективний спосіб отримання високоякісного насіннєвого матеріалу. Такий метод дозволяє зменшити ризик передачі патогенів та підвищити врожайність, зокрема завдяки використанню сучасних технологій, таких як: *in vitro*, гідропоніка та аеропоніка.

В країнах Європи, до мінібульб відносять бульби масою від 0,5 г. Відмічається, що мінібульби є проміжною ланкою між біотехнологічним методом оздоровленого насіннєвого матеріалу та елітним насінництвом (Chifetete & Dames, 2020; Hussain et al., 2021).

Слід відмітити, що в науці й практиці нагромаджено чималий досвід вирощування насіннєвої картоплі на основі оздоровлених мінібульб. Дана технологія у культиваційних спорудах досить відпрацьована (Wijesinha–Bettoni & Mouillé, 2019; El-Ramady et al., 2022).

Якщо проаналізувати світовий досвід культивування мінібульб картоплі, то в Ірландії мінібульби одержують під час садіння мікророслин із щільністю 400 шт/м^2 у стерилізований торфокомпостний субстрат. Кожна з рослин за 90 днів дає приблизно 5 бульб діаметром до 25 мм і масою близькою 5 г. За такою технологією можна отримувати три регенерації. Під час садіння мінібульб урожайність становить близько 42–45 т/га, у тому числі – 32 т/га бульб розміром понад 30 мм. У Нідерландах одержане бульбове потомство від рослин *in vitro* прирівнюють до клонового матеріалу. З нього вирощують супер-супереліту. Загалом в країнах Західної Європи щорічно вирощують приблизно 800 тис. шт. пробіркових рослин, у Канаді та США – 580 тис. В Угорщині дослідження, засвідчили, що за відповідної густоти насадження та агротехніки в польових умовах урожай мінібульб масою від 0,5 до 8 г становить від 33 до 49,3 т/га (Fumia et al., 2022; Pantelić, 2022; Pysarenko et al., 2022).

Мінібульби отримують за живцювання рослин *in vitro* та подальшого їх культивування в овочевих касетах. Пробіркові рослини розрізають за кількістю наявних листків і висаджують у перліт на рівень бруньки за густоти садіння 70*10–70*30 см. В касеті розміщують біля 500 живців, а в лабораторних умовах на 1 кв. м. корисної площі – 2500 шт. (Сидоренко, 2019).

Культивування проводяться в контрольованих умовах закритих приміщень: освітлення 24 години на добу, при температурі 17–18 °С, вологість перших 10 діб має бути 95–100%, надалі – 60–70%. Субстрат замочу-

ють розчином за прописом Мурфсіге-Скуга з додаванням сполуки срібла для попередження розвитку патогенної мікрофлори.

На 20–25 добу після живцювання рослин утворили від 7 до 9 листків, висота становила 120–125 мм, товщина стебла – 2,6–3,3 мм, площа листкової поверхні – 2500–3500 кв. мм, маса вегетативної частини – 1,6–2,1 г. Таку розсаду висаджують у відкритий ґрунт в попередньо сформовані гребені, в які вмонтовано систему краплинного зрошення. Приживлення в таких умовах становило 100%. Розміщували польові досліди просторово ізольованими від джерел і переносників вірусної інфекції (Taktaiev et al., 2023).

Дослідження показують, що щільність посадки значно впливає на кількість та масу мінібульб. Наприклад, у менш густих посадках урожайність була вищою, що узгоджується з даними інших авторів (Шевченко, 2017). Сорти картоплі демонстрували різну реакцію на умови культивації: ранні сорти швидше завершували цикл, тоді як пізні продовжували формувати бульби протягом усього періоду зростання (Кузьменко і Палій, 2018).

Варто відмітити найголовніші фактори, що впливають на врожайність насіннєвого матеріалу: *щільність посадки* – збільшення щільності може знижувати кількість та масу бульб через конкуренцію за ресурси. Дослідження підтверджують, що менш щільні посадки забезпечують кращі результати; *температура та освітлення* – температурний режим має значний вплив на швидкість бульбоутворення. Вищі температури можуть продовжувати вегетаційний період, але знизити врожайність через затримку дозрівання; *тип вихідного матеріалу* – рослини, отримані з *in vitro* матеріалу, швидше завершують вегетаційний цикл і формують менші бульби порівняно з тими, що були висаджені з мінібульб (Федоров, 2020).

Технологія гідропоніки та аеропоніки для вирощування мінібульб. Гідропоніка та аеропоніка – це сучасні методи культивування мінібульб, які дозволяють підвищити ефективність виробництва та забезпечити високоякісний насіннєвий матеріал. Перелічені підходи активно використовуються у сільському господарстві, оскільки знижують ризик зараження патогенами і підвищують контроль над умовами вирощування.

Що стосується гідропоніки, то цей спосіб передбачає вирощування рослин без ґрунту у водних розчинах із поживними речовинами. Він має кілька переваг у порівнянні з традиційним вирощуванням: поживні речовини надходять безпосередньо до кореневої системи, що стимулює швидше зростання; знижений ризик зараження ґрунтовими патогенами; легкий контроль рівня поживних речовин і pH розчину.

Використання гідропоніки підвищує продуктивність, дозволяючи отримати більше мінібульб на одиницю площі. Дослідження показують, що середній вихід бульб може значно перевищувати традиційні способи культивування (Кузьменко і Палій, 2018).

Аеропоніка являється більш технологічно оптимізованим способом, де коріння рослин знаходяться у повітрі та регулярно зрошується розчином поживних речовин. Даний спосіб має ряд своїх переваг: ефективніше використання води та поживних речовин порівняно з гідропонікою; підвищений доступ коренів до кисню, що стимулює швидке зростання і підвищує продуктивність; можливість частого збирання мінібульб у короткі інтервали часу.

Дослідження Кузьменка (2018) та Федорова (2020) показали, що аеропонні системи можуть підвищити вихід бульб до 50 шт. на рослину залежно від сорту. Аеропоніка також дозволяє контролювати температурні умови, що зменшує вплив стресових факторів на ріст бульб (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняння способів вирощування мінібульб з використанням технології гідропоніки та аеропоніки

Параметр	**Гідропоніка**	**Аеропоніка**
Витрати води	Вищі	Нижні
Контроль умов	Високий	Дуже високий
Продуктивність	Висока	Вища при належному контролі
Ризик хвороб	Низький	Дуже низький

Враховуючи вищенаведене, можна говорити, що аеропоніка та гідропоніка є ефективними альтернативами традиційному вирощуванню мінібульб картоплі. Аеропоніка, хоч і потребує більшої інвестиції на початку, забезпечує вищу продуктивність, завдяки швидшому доступу до кисню та поживних речовин. Гідропоніка, у свою чергу, є економічно вигіднішою та простішою у використанні, що робить її привабливим варіантом для масштабного виробництва.

Розмноження мінібульб в польових умовах. Вирощування мінібульб є важливим етапом у процесі розмноження високоякісного насіннєвого матеріалу картоплі, оскільки вони забезпечують оздоровленим насіннєвим матеріалом. Мінібульби отримують у результаті вирощування рослин із безвірусних мікробульб або тканин *in vitro*. Подальше їхнє розмноження в польових умовах потребує дотримання ряду агротехнічних вимог для забезпечення високої врожайності та якості насіння (Hussain et al., 2021).

Що стосується агротехнічних умов розмноження мінібульб у польових умовах, слід відмітити, що при перенесенні мінібульб на польові ділянки важливо враховувати кілька ключових факторів:

Вибір ділянки. Для вирощування мінібульб рекомендується обирати поля з легкими ґрунтами, які мають добру аерацію та не схильні до застою води. Найкращі результати досягаються на полях, де картопля не вирощувалася протягом останніх 2–3 років, що зменшує ризик зараження патогенами.

Підготовка ґрунту. Глибоке рихлення ґрунту та внесення органічних добрив перед посадкою сприяють розвитку потужної кореневої системи. Рекомендовано також вносити комплексні мінеральні добрива з підвищеним вмістом калію та фосфору, що стимулює утворення бульб.

Схеми посадки. Оптимальна схема посадки для мінібульб варіюється залежно від сорту, але загалом відстань між рядами має становити 70 см, а між рослинами в ряду – 20–25 см. Це забезпечує належну вентиляцію рослин і знижує ризик розвитку грибкових хвороб.

Полив та догляд за посівами. Мінібульби вимагають регулярного поливу, особливо на початкових етапах вегетації. Система крапельного зрошення дозволяє ефективно підтримувати оптимальний рівень вологості та зменшує ймовірність поширення хвороб. Окрім цього, важливим є своєчасне видалення бур'янів і проведення міжрядних обробітків для покращення аерації ґрунту.

Що стосовно фітосанітарного контролю та боротьби з хворобами слід враховувати, що польові умови створюють ризик зараження мінібульб такими захворюваннями, як фітофтороз та альтернаріоз. Тому регулярний фітосанітарний моніторинг є обов'язковим елементом догляду. З метою захисту та попередження збудників хвороб рекомендується використовувати біопрепарати або фунгіциди, сертифіковані для насіннєвих культур, із попереджувальним обробленням бульб перед посадкою (Кузьменко і Палій, 2018; Kang et al., 2020).

Для запобігання ураженню бульб збудниками грибних та бактеріальних хвороб, розвитку сухих гнилей, перед збиранням бульб картоплиння слід скошувати подрібнювачем. Оптимальний для скошування картоплиння – за 14 днів до збирання. Більш тривале витримання бульб в ґрунті посилює імовірність інфікування фузаріозом і паршею (Шевченко, 2017).

Збирання слід проводити в період фізіологічного дозрівання бульб, коли шкіра на них досить добре зміцніла. Вже після викопування бульби рекомендовано просушувати в полі 1–2 години, після чого зібрати та помістити в контейнер для зберігання в сховищі. Врожай від мінібульб використовують як добазовий насіннєвий матеріал для відтворення еліти за скороченою схемою (Сидоренко, 2019).

Висновки

Розмноження мінібульб у польових умовах є важливим етапом виробництва оздоровленого та високопродуктивного насіннєвого матеріалу картоплі. Виконання агротехнічних заходів у поєднанні з контролем за хворобами дозволяє досягти високої врожайності та покращити якість мінібульб. Цей процес потребує ретельного дотримання технологій, особливо на ранніх етапах росту рослин, щоб уникнути втрат урожаю через хвороби та несприятливі погодні умови.

У перспективі реалізація результатів цього дослідження може сприяти підвищенню конкурентоспроможності агросектору України, покращуючи якість та доступність насіннєвого матеріалу для товаровиробників. З огляду на глобальні виклики, такі як зміни клімату та зростання населення, інноваційні підходи до вирощування картоплі стають особливо важливими для забезпечення продовольчої безпеки.

Слід зазначити, що важливо дослідити можливість отримання мінібульб з меристемних рослин та мінібульб картоплі під час їх укорінення на етапі *in vitro – ex vitro* з подальшим збиранням мінібульб та вирощування у відкритому ґрунті. Водночас, передбачається додатковий насіннєвий матеріал з мінібульб після проходження етапу їх пробудження протягом одного вегетаційного року в умовах закритого ґрунту.

Список використаної літератури

Бондарчук А.А., Верменко Ю.Я., Рязанцев В.Б., Рязанцев М.В. Біотехнологія в насінництві картоплі. Вінниця. 2016. С. 42–43.

Кузьменко А.М., Палій Ю.І. Управління поливом при вирощуванні мінібульб. *Аграрні технології України.* 2018. № 2(1). С. 45–49.

Сидоренко В.П. Особливості підготовки ґрунту для мінібульб. *Аграрний вісник.* 2019. № 11(5). С. 22–26.

Федоров Л.Г. Роль добрив у вирощуванні насіннєвої картоплі. *Журнал аграрної хімії.* 2020.№ 6(3). С. 34–40.

Шевченко Д.К. Фітосанітарний моніторинг при розмноженні картоплі. *Фітопатологія та захист рослин.* 2017. № 8(2). С. 19–24.

Chifetete V.W., Dames J.F. Mycorrhizal Interventions for Sustainable Potato Production in Africa. Front. Sustain. *Food Syst.* 2020. № 4. 593053. https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.593053.

El-Ramady H., Seliem M.K., El-Mahrouk M.E., Taha N., Bayoumi Y., Shalaby T.A. An academic and technical overview on plant micropropagation challenges. *Horticulturae.* 2022. № 8(8). P. 677.

Fumia N., Pironon S., Rubinoff D., Khoury C.K., Gore M.A., Kanta M.B. Wild relatives of potato may bolster its adaptation to new niches under future climate scenarios. *Food Energy Secur.* 2022. № 11. e360. https://doi.org/10.1002/fes3.360.

Hussain M., Qayum A., Xiuxiu Z., Liu L., Hussain K., Yue P., Yue S., Koko Y.F.M., Hussain A., Li X. Potato protein: An emerging source of high quality and allergy free protein, and its possible future based products. *Food Research International.* 2021. № 148. 110583. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110583.

Kang Y., Zhang W., Yang X., Liu Y., Fan Y., Shi M., Yao K., Qin S. Furrow–ridge mulching managements affect the yield, tuber quality and storage of continuous cropping potatoes. *Plant, Soil and Environment.* 2020. № 66(11). pp. 576–583. https://doi.org/10.17221/316/2020–PSE.

Kovalenko V., Butenko Ye., Serdiuk P., Shevych A., Serdiuk O., Zakorko V. Implementation of the potential of dietary potato varieties in the conditions of the Northeastern Forest-Steppe of Ukraine. *Modern Phytomorphology.* 2024. Vol. 18. pp. 52–55. ISSN 2226-3063.

Pantelić D. Effects of cultivar and plant origin on minituber production in aeroponics. *Horticulturae.* 2022. № 8(10). P. 915.

Pysarenko N., Sydorchuk V., Zakharchuk N. Study of adaptive ability of potato varieties by the “yield” feature in the conditions of Central Polissia. *Foothill and Mountain Agriculture and Stockbreeding.* 2022. № 71(1). pp. 123–140. https://doi.org/10.32636/01308521.

Taktaiev B.A., Furdyga M.M., Oliinyk T.M., Podberezko I.M., Podhaietskyi A.A., Cherednychenko L.M. Creation of disease-resistant potato breeding material with a complex of main economic and valuable characters. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Agronomy and Biology.* 2023. № 53(3). pp. 91–98. https://doi.org/10.32782/agrobio.2023.3.13.

Wijesinha–Bettoni R., Mouillé B. The Contribution of Potatoes to Global Food Security, Nutrition and Healthy Diets. *American Journal of Potato Research.* 2019. № 96(2). pp. 139–149. https://doi.org/10.1007/s12230–018–09697–1.

References

Bondarchuk, A.A., Vermenko, Yu.Ia., Riazantsev, V.B., & Riazantsev, M.V. (2016). Biotekhnolohiia v nasinnytstvi kartopli [Biotechnology in potato seed production]. Vinnytsia, pp. 42–43 [in Ukrainian].

Kuzmenko, A.M., & Palii, Yu.I. (2018). Upravlinnia polyvom pry vyroshchuvanni minibulb [Irrigation management when growing minibulbs]. *Ahrarni tekhnolohii Ukrainy [Agricultural technologies of Ukraine]*, 2(1), 45–49 [in Ukrainian].

Sydorenko, V.P. (2019). Osoblyvosti pidhotovky gruntu dlia minibulb [Features of soil preparation for minibulbs]. *Ahrarnyi visnyk*, 11(5), 22–26 [in Ukrainian].

Fedorov, L.H. (2020). Rol dobryv u vyroshchuvanni nasinnievoi kartopli [The role of fertilizers in growing seed potatoes]. *Zhurnal ahrarnoi khimii [Journal of agricultural chemistry]*, 6(3), 34–40 [in Ukrainian].

Shevchenko, D.K. (2017). Fitosanitarnyi monitorynh pry rozmnozhenni kartopli [Phytosanitary monitoring during potato propagation]. *Fitopatolohiia ta zakhyst roslyn [Phytopathology and plant protection]*, 8(2), 19–24 [in Ukrainian].

Chifetete, V.W, & Dames, J.F. (2020). Mycorrhizal Interventions for Sustainable Potato Production in Africa. Front. Sustain. *Food Syst*, 4, 593053. https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.593053 [in English].

El-Ramady, H., Seliem, M.K., El-Mahrouk, M.E., Taha, N., Bayoumi, Y., & Shalaby, T.A. (2022). An academic and technical overview on plant micropropagation challenges. *Horticulturae,* 8(8), 677. https://doi.org/10.3390/horticulturae8080677 [in English].

Fumia, N., Pironon, S., Rubinoff, D., Khoury, C.K., Gore, M.A., & Kanta, M.B. (2022). Wild relatives of potato may bolster its adaptation to new niches under future climate scenarios. *Food Energy Secur*, 11, e360. https://doi.org/10.1002/fes3.360 [in English].

Hussain, M., Qayum, A., Xiuxiu, Z., Liu, L., Hussain, K., Yue, P., Yue, S., Koko, Y.F.M., Hussain, A., & Li, X. (2021). Potato protein: An emerging source of high quality and allergy free protein, and its possible future based products. *Food Research International*, 148, 110583. https://doi.org/ 10.1016/j.foodres.2021.110583 [in English].

Kang, Y., Zhang, W., Yang, X., Liu, Y., Fan, Y., Shi, M., Yao, K., & Qin, S. (2020). Furrow–ridge mulching managements affect the yield, tuber quality and storage of continuous cropping potatoes. *Plant, Soil and Environment,* 66(11), 576–583. https://doi.org/10.17221/316/2020–PSE [in English].

Kovalenko, V., Butenko, Ye., Serdiuk, P., Shevych, A., Serdiuk, O., & Zakorko, V. (2024). Implementation of the potential of dietary potato varieties in the conditions of the Northeastern Forest-Steppe of Ukraine. *Modern Phytomorphology,* Vol. 18, 52–55. ISSN 2226-3063 [in English].

Pantelić, D. (2022). Effects of cultivar and plant origin on minituber production in aeroponics. *Horticulturae*, 8(10), 915. https://doi.org/10.7251/ZARS2301009B [in English].

Pysarenko, N., Sydorchuk, V., & Zakharchuk, N. (2022). Study of adaptive ability of potato varieties by the "yield" feature in the conditions of Central Polissia. *Foothill and Mountain Agriculture and Stockbreeding*, 71(1), 123–140. https://doi.org/10.32636/01308521 [in English].

Taktaiev, B.A., Furdyga, M.M., Oliinyk, T.M., Podberezko, I.M., Podhaietskyi, A.A., & Cherednychenko, L.M. (2023). Creation of disease-resistant potato breeding material with a complex of main economic and valuable characters. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Agronomy and Biology*, 53(3), 91–98. https://doi.org/10.32782/agrobio.2023.3.13 [in English].

Wijesinha–Bettoni, R., & Mouillé, B. (2019). The Contribution of Potatoes to Global Food Security, Nutrition and Healthy Diets. *American Journal of Potato Research.* 96(2), 139–149. https://doi.org/ 10.1007/s12230–018–09697–1 [in English].

Отримано: 28.10.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

УДК 634.7
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.11

ПРОДУКТИВНІСТЬ РАННЬОСТИГЛИХ СОРТІВ ЛОХИНИ В УМОВАХ ПРИКАРПАТТЯ

У. М. Карбівська[1], Д. І. Шеленко[2], В. В. Чумбей[3], О. Д. Турак[4]

У статті представлено результати дослідження продуктивності лохини в умовах Прикарпаття. Дослідження проводилося на базі фермерського господарства «Житні Лани», що розташоване в селі Цуцилів Надвірнянського району Івано-Франківської області. Господарство відзначається сприятливими природними умовами для вирощування різних сільськогосподарських культур, зокрема лохини. У процесі роботи використовували польовий, лабораторний, математичний, статистичний та розрахунковий методи.
У дослідженні розглядається продуктивність ранньостиглих сортів лохини в умовах Прикарпаття. Проаналізовано вплив кліматичних факторів регіону на врожайність і якість ягід, а також визначено оптимальні агротехнічні заходи для підвищення продуктивності насаджень. Оцінка проведена на основі тривалих польових досліджень, що включали вивчення динаміки росту, адаптивності рослин та їх плодоношення залежно від погодних умов та систем покращення. Отримані результати сприяють обґрунтуванню ефективних підходів для вирощування лохини в умовах помірного клімату Прикарпаття, що є успіхом для розвитку регіонального ягідництва. Встановлено , що середня маса ягід сорту Патріот становила 2,5–3,5 г, а маса ягід сорту Спартан була на 0,5 г більшою. Найменші ягоди були у сорту Дюк – з масою від 1,5 до 2,5 г. Сорт

[1] доктор сільськогосподарських наук, професор,
професор кафедри лісового і аграрного менеджменту
(Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ)
e-mail: uliana.karbivska@pnu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-0540-8887
[2] доктор економічних наук,
професор кафедри підприємництва, торгівлі та прикладної економіки
(Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ)
e-mail: diana.shelenko@pnu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-9214-7258
[3] кандидат сільськогосподарських наук,
завідувач кафедри агрономії
(Івано-Франківський фаховий коледж
Львівського національного університету природокористування, м. Івано-Франківськ)
e-mail: volodumyr.chumbej@fclnup.if.ua
ORCID: 0009-0001-0398-1276
[4] викладач кафедри лісового і аграрного менеджменту
(Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ)
e-mail: oksana.turak@pnu.edu.ua
ORCID: 0009-0008-3956-9399

Дюк має приємний смак і високу стійкість до транспортування. Сорт Спартан славиться великими ягодами та ароматом, що робить його популярним на ринку. Сорт Патріот має м'яку ягоду з насиченим смаком, але трохи менше стійкий до зберігання в порівнянні з іншими сортами.
Вміст цукрів, що впливає на смакові характеристики сорту Дюк – 10,1%, що надає йому солодшого смаку. У сорту Патріот цей показник дещо нижчий – 9,4%. Вміст вітаміну С, який підтримує антиоксидантні та імунні властивості, найбільший у сорті Спартан – 10,5 мг на 100 г, а найнижчий у Патріота – 8,7 мг на 100 г.

Ключові слова: *ранньостиглі сорти, ягоди, лохина, фази розвитку, продуктивність, біохімічний склад.*

PRODUCTIVITY OF EARLY-RIPENING BLUEBERRY VARIETIES IN THE PRE-CARPATHIAN REGION

U. M. Karbivska, D. I. Shelenko, V. V. Chumbei, O. D. Turak

The article presents the results of a study on blueberry productivity in the Pre-Carpathian region. The research was conducted at the «Zhytnyi Lany» farm, located in the village of Tsutsyliv, Nadvirna district, Ivano-Frankivsk region. The farm is distinguished by favorable natural conditions for cultivating various agricultural crops, particularly blueberries. Field, laboratory, mathematical, statistical, and analytical methods were used in this study.
The research examines the productivity of early-ripening blueberry varieties under Pre-Carpathian conditions. It analyzes the impact of climatic and substantiated regional factors on berry yield and quality, and identifies optimal agrotechnical measures to increase plantation productivity. The evaluation was based on long-term field studies, which included examining the dynamics of plant growth, adaptability, and fruiting in response to weather conditions and improvement systems. The findings support effective approaches to cultivating blueberries in the moderate climate of the Pre-Carpathians, which is promising for the development of regional berry farming.
It was found that the average berry weight of the Patriot variety was 2.5–3.5 grams, with the Spartan variety being 0.5 grams heavier. The smallest berries were from the Duke variety, weighing between 1.5 and 2.5 grams. Duke berries have a pleasant taste and high transport resistance. The Spartan variety is known for its large berries and aroma, making it popular in the market. The Patriot variety features a soft berry with a rich flavor, though it is slightly less durable in storage compared to other varieties.
The sugar content, influencing the taste characteristics of the berries, was highest in the Duke variety at 10.1%, giving it a sweeter flavor. The Patriot variety had a slightly lower sugar content at 9.4%. The vitamin C content, which supports antioxidant and immune properties, was highest in the Spartan variety at 10.5 mg per 100 g, and lowest in the Patriot at 8.7 mg per 100 g.

Key words: *early-ripening varieties, berries, blueberries, growth phases, productivity, biochemical composition.*

Вступ

Україна має унікальні умови та можливості стати потужною плодово-ягідною державою – теза, яка сформульована теоретиками й підтверджена практиками ведення промислового ягідництва (Галатович, 2019). Зокрема, А. І. Бурлака виділив найсприятливіші зони для промислового ягідництва: Придністровська підзона Чернівецької й Тернопільської областей, Низинна підзона Закарпатської області, Передкарпатська підзона Івано-Франківської області, лісостепові райони Львівської, Волинської і Рівненської областей (Бурлака, 2006).

Наразі у всьому світі тренд на здоровий спосіб життя, і споживання ягідної продукції стає важливою складовою. Щороку обсяги виробництва ягід у країнах ЄС та основні постачальники на ринок зростають у середньому на 6% протягом останніх європейських п'яти років. Україна має можливість стати провідним виробником і експортером таких традиційних і популярних ягід, як полуниця (суниця садова), малина, чорна смородина, аґрус, чорниця та ожина, особливо на ринку Європи. Безумовно, цими перспективними напрямками експорту можуть стати виробництво органічної ягідної продукції та вирощування нішевих культур, таких як актинідія, жимолость, лимонник, а також ягід з категорії «суперпродукти»: чорниця, обліпиха, ожина, лохина, журавлина та чорноплідна горобина (Савенко, 2017).

Лохина – це одна з ягідних культур, площі під якими у світі розширюються стрімкими темпами. І саме Україна за кілька останніх років стала одним із найбільших європейських виробників лохини та світовим лідером за темпами зростання площ під насадженнями цієї популярної та корисної ягоди (Поперечна, 2020).

Вирощування лохини в Україні стало дуже популярним останніми роками через значне зростання попиту, особливо в період пандемії. Згідно зі статистикою, з 2017 по 2020 рік площі під цією культурою збільшилися на 1,5 тис. га – до 4,4 тис. га, а до кінця 2022 року досягли 5,5 тис. га. Обсяги вирощування лохини перевищили 13 тисяч. Зі зростанням конкуренції на ринку свіжих ягід виробникам варто приділяти увагу всім аспектам, що впливають на виробництво продукції преміальної якості кожний фактор на різних етапах є визначальним.

Серед ягідних культур в останні роки значно зросли площі вирощування лохини високої, чому сприяють ґрунтово-кліматичні умови північно-західного регіону України і високі ціни (120–140 грн/кг на оптовій торгівлі і 180–240 грн/кг при роздрібній). Розширенню площ лохини сприяє зростання обсягів виробництва посадкового матеріалу, який в Україні вирощують здебільшого біотехнологічними методами, і ціна, яка значно нижча (55–65 грн), ніж при закупівлі за кордоном (75–120 грн). Передовий досвід закордонних товаровиробників при вирощуванні лохини у відкритому ґрунті, адаптований до умов України, дозволяє отримувати до 7–8 кг ягід з куща, що забезпечує не менше 70–85 грн чистого прибутку на кожному кілограмі реалізованої продукції. Значним резервом надходження ранньої ягідної продукції є вирощування лохини у весняних теплицях, коли урожай ранніх сортів ягід поповнюється нею з третьої декади травня, а вартість зростає до 200–250 грн за кілограм (Шевчук і Остапчук, 2019).

Лохина (Vaccinium corymbosum L.) за реакцією на ґрунтові умови особлива рослина. Допустимий рівень pH – 4,0–5,5; оптимальний рівень pH – 4,5–5,0. Добре росте й плодоносить на кислих торфових, торфо-піщаних ґрунтах, з близьким заляганням ґрунтових вод і погано культивується на звичайних мінеральних садових землях, де інші ягідні культури почувають себе чудово. Роботи з окультурювання лохини започаткували у США наприкінці XIX – початку XX століття. Вирощування набуло значних масштабів, що дало змогу використовувати площі, які вважали непридатними для сільськогосподарського виробництва (Рожко, 2019). Переваги культури: на придатних ґрунтах врожайна довговічна цінна ягідна культура.

Метою роботи було визначення продуктивності лохини ранньостиглих сортів в умовах Прикарпаття.

Матеріал і методи

Дослідження проводилося в 2023–2024 роках на базі фермерського господарства «Житні Лани», що розташоване в селі Цуцилів Надвірнянського району Івано-Франківської області. Це господарство має сприятливі природні умови для вирощування сільськогосподарських культур, зокрема лохини. Ягідні насадження було закладено навесні 2019 року (1,5-річні саджанці) за схемою 3,0 х 0,8 м, із застосуванням системи краплинного зрошення. Дослід проводився з триразовою повторністю, де у кожній повторності висаджено по 15 рослин у рядку.

Для підтримання оптимального рівня родючості перед висадкою лохини було сплановано застосування комбінованої системи удобрення, що створює найкращі умови для розвитку ягідних насаджень та успішного плодоношення. Норми внесення добрив визначалися з вмістом поживних речовин на підставі потреби рослин. Підживлення проводили добривом Флорвіт – по 100 г на кущ (з 15.04 до 15.06 щотижня по 20 г на кущ), а у вересні–жовтні застосовували каліймонофосфат по листу – 5–10 г на кущ тричі. У лютому–березні використовували препарати ЗОВ (агропромніка, 30 г/10 л) та медян екстра (Суми Агро, 30 г/10 л). Ґрунт дерново-підзолистий, з pH 4,5, підкислення не потребує.

Висаджували ранньостиглі сорти лохини: Дюк (Duke), Спартан (Spartan), Патріот (Patriot) (Балабак та ін., 2017).

У роки проведення досліджень кількість опадів відрізнялась від середніх багаторічних значень. Кліматичні умови 2023 року були сприятливішими для розвитку лохини: середня температура впродовж вегетаційного періоду (травень–серпень) коливалася від +14°C у травні до +21,1°C у серпні, що забезпечило стабільні умови для росту рослин. Крім того, у 2023 році опадів випало значно більше за середньобагаторічні показники, особливо в червні (174,5 мм) та липні (152 мм), що було позитивним чинни-

ком для вологолюбної лохини. У 2024 році кількість опадів була нижчою за норму. Температурні показники, традиційно вищі через глобальне потепління останніх двох десятиліть, перевищували норму майже по всіх місяцях, особливо влітку.

Досліди закладено згідно методики проведення польових досліджень з плодово-ягідними культурами (Єщенко та ін., 2014).

Результати та обговорення

Вегетація ранньостиглих сортів лохини починалася у звичні строки. Дюк – ранньостиглий сорт з відмінною стійкістю до хвороб. Спартан відзначається хорошим смаком і високою продуктивністю. Патріот має великі ягоди і високу морозостійкість. Пробудження бруньок у сорту Дюк і Спартан припадало на кінець березня – початок квітня, у Патріоту – початок квітня. Це перший етап, коли бруньки починають розпускатися після зимового спокою. Цвітіння у сорту Дюк припадало на кінець квітня – початок травня, Спартан і Патріот – на початок травня. Цей етап характеризується утворенням квітів, які є важливими для запилення. Усі три сорти (Дюк, Спартан, Патріот) мають схожий період формування плодів – середина травня. На цьому етапі відбувається утворення і розвиток плодів. Дозрівання плодів припадало у сортів Дюк і Спартан на кінець червня, Патріоту – початок липня. У цей період плоди досягають споживчої зрілості. Всі сорти плодоносять в липні, що вказує на їхню зрілість та готовність до збору. Усі три сорти мають однаковий вегетаційний період – 100–120 днів, що свідчить про схожість у тривалості росту від початку до збору врожаю.

Спостереження показало, що першим почав вегетацію сорт Патріот, а дещо пізніше – сорти Спартан та Дюк. Цвітіння в ранньостиглій групі розпочав сорт Патріот 5 квітня, пізніше сорт Дюк – 14 квітня. Період цвітіння у сорту Патріот тривав 21 день, Дюк – 18, Спартан – 16 днів. Від завершення цвітіння до початку стиглості пройшло: для сорту Патріот – 28 дні, Дюк – 22 дні, Спартан – 32 дні. Перші зрілі ягоди з'явилися у сорту Патріот 18 травня, а у Спартан – 3 червня. Тривалість збирання ягід у сортів Патріот і Дюк становила 42 дні, а у Спартан – 28 днів.

Дюк – добре розгалужений, але з більш розлогими кущами. Спартан – компактні кущі, що робить його зручним для збору. Патріот – має велику стійкість до зовнішніх факторів, завдяки чому кущі можуть досягати значних розмірів (табл. 1).

Сорт Дюк має приємний смак і високу стійкість до транспортування. Сорт Спартан славиться великими ягодами та ароматом, що робить його популярним на ринку. Сорт Патріот має м'яку ягоду з насиченим смаком, але трохи менше стійкий до зберігання в порівнянні з іншими сортами. Масове достигання досягло ягід ранньостиглих сортів припадало на першу декаду липня. Маса ягід є основним біометричним показником, який визначає їх товарну якість.

Результати досліджень, в середньому за два роки, показали, що середня маса ягід сортів різна (табл. 2). У сорту Патріот вона становила в середньому 2,5–3,5 грам, а сорту Спартан була більшою на 0,5 грам, найменшими були ягоди сорту Дюк (1,5–2,5 грам).

Сорт Дюк мав середню масу ягід, яка відрізняється хорошою щільністю, у сорту Спартан ягоди великі, які є особливо популярними на ринку. Сорт Патріот також мав великі ягоди, але з м'якішою текстурою, що робить їх ідеальними для свіжого споживання.

Споживчі властивості ягід залежали від ряду ознак, які визначалися за допомогою

Таблиця 1

Структура кущів лохини ранньостиглих сортів

Параметр	Дюк	Спартан	Патріот
Висота куща	1,2–1,5 м	1,2–1,5 м	1,5–2,0 м
Ширина куща	1,0–1,2 м	0,9–1,2 м	1,0–1,5 м
Форма куща	Кущистий, розлогий	Компактний, прямостоячий	Напіврозлогий
Гіллястість	Середня, багато бічних гілок	Висока, багато бічних гілок	Середня, менше бічних гілок
Листя	Середнього розміру, зелене	Середнього розміру, темно-зелене	Велике, світло-зелене
Урожайність	Висока	Дуже висока	Висока
Стійкість до хвороб	Середня	Висока	Висока

Таблиця 2

Продуктивність ранньостиглих сортів лохини (середнє за два роки)

№ п/п	Показник	Сорти лохини		
		Дюк	**Спартан**	**Патріот**
1	Середня маса ягоди (г)	1,5–2,5	2,0–3,0	2,5–3,5
2	Діапазон маси ягід (г)	1,2–2,8	1,8–3,2	2,2–3,8
3	Відсоток великих ягід, %	60–70	70–80	65–75
4	Відсоток малих ягід, %	30–40	20–30	25–35
5	Консистенція	Щільна	Щільна	М'яка
6	Середній розмір ягід (см)	1,5–2,5	2,0–3,0	2,0–3,0

дегустації та біохімічного аналізу. Як свідчать результати досліджень, ягоди ранньостиглих сортів лохини мали темно-синє забарвлення шкірочки. Інтенсивність воскового нальоту ягід сорту Патріот слабка, всіх інших сортів – середня. Смакові якості ягід лохини залежать від співвідношення у них цукрів та кислот, а харчові цінності – від вмісту в них речовин та сполук, необхідних для організму людини. Аналіз біохімічного складу плодів засвідчив, що сорт Патріот включає найнижчий уміст цукрів – від 9,4%, понад 8,7 мг/100 г вітаміну С та кислотність 1,23% (табл. 3).

У сорту Спартан показник сухих розчинних речовин найвищий – 16,1%, що свідчить про більший вміст поживних речовин. Вміст цукрів, який є важливим фактором смакових характеристик, найвищий у сорту Дюк – 10,1%, надаючи ягодам цього сорту солодший смак. Сорт Патріот має трохи нижчий показник цукру – 9,4%. Вітамін С,

Таблиця 3

Біохімічний склад ягід лохини, 2024 р.

Сорт	Сухі розчинні речовини, %	Цукри, %	Кислотність, %	Вітамін С, мг/100 г
Дюк	15,7	10,1	1,2	9,0
Спартан	16,1	9,8	1,1	10,5
Патріот	14,9	9,4	1,3	8,7

який забезпечує антиоксидантні та імунопідтримуючі властивості, найбільш наявний у сорту Спартан – 10,5 мг на 100 г, а найнижчий у сорту Патріот – 8,7 мг на 100 г.

Висновки

1. Встановлено, що середня маса ягід сорту Патріот становила в середньому 2,5–3,5 г, сорту Спартан була більшою на 0,5 г, найменшими були ягоди сорту Дюк (1,5–2,5 г).

2. Вміст цукрів, який є важливим фактором смакових характеристик, найвищий у сорту Дюк – 10,1%, надаючи ягодам цього сорту солодший смак. Патріот має трохи нижчий показник цукру – 9,4%. Вітамін С, який забезпечує антиоксидантні та імунопідтримуючі властивості, найбільше представлений у сорті Спартан – 10,5 мг на 100 г, а найнижчий у Патріоті – 8,7 мг на 100 г.

3. Для вирощування в умовах Прикарпаття рекомендуємо сорт Спартан, який показав найкращі показники.

Список використаної літератури

Балабак А.Ф., Пиж'янова А.А., Дмитрієв В.І. Чорниця високоросла (Vaccinium corymbosum L.): біологічні особливості, інтродукція, сорти, технологія розмноження і виробництва. Київ, 2017. 288 с.

Бурлака А.І. Ефективність інтенсифікації ягідництва в Західному регіоні України: автореф. дис. … канд. екон. наук. Житомир, 2006. 20 с.

Галатович Є. Ягідництво: проблеми та перспективи. *Пропозиція.* [Електронний ресурс]. URL: https://propozitsiya.com/ua/yagidnictvo-problemi-ta-perspektivi (дата звернення 12.03.2019).

Єщенко В.О., Копитко П.Г., Костогриз П.В., Опришко В.П. Основи наукових досліджень в агрономії. Вінниця. 2014. 332 с.

Поперечна О. Лохина – ягода № 1 в Україні. *Ягідник.* 2020. № 1. С. 19–21.

Рентабельність органічних ягід сягає 200%. *Agroexpert.* 2016. № 4 (93). [Електронний ресурс]. URL: http://www.agroexpert.ua.../rentabelnist-organichnikh-jagid-sjagaje-200.html (дата звернення 12.10.2024).

Рожко І.С. Основоположні засади ягідництва. *Вісник ЛНАУ.* 2019. № 23. С. 124–128.

Савенко Г.Є. Розвиток ринку продукції ягідних культур України в умовах євроінтеграції. *Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету.* 2017. № 23(1). С. 132–135. [Електронний ресурс]. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvmgu_eim_2017_23(1)__30 (дата звернення 12.10.2024).

Савіна О.І., Попович Г.Б., Шейдик К.А., Зозуля І.Ю. Формування продуктивності лохини за різних способів мульчування. *Міжнародний науковий журнал «Граль науки».* 2024. № 37. С. 155–160. https://doi.org/10.32782/2415-8240-2024-104-1-136-148.

Шевчук М., Остапчук І. Продуктивність сортів лохини високорослої (V.X. covilleanum) в умовах зимових теплиць. *Науковий вісник Східноєвропейського національного університету ім. Л. Українки.* 2019. № 4 (388). С. 40–43. https://doi.org/10.29038/2617-4723-2019-388-4-57-62.

Шевчук М.Й., Бортнік Т.П. Лохина висока. Луцьк : ПП Іванюк. 2017. 230 с.

References

Balabak, A.F., Pyzh'ianova, A.A., & Dmytriiev, V.I. (2017). Chornytsia vysokorosla (Vaccinium corymbosum L.): biolohichni osoblyvosti, introduktsiia, sorty, tekhnolohiia rozmnozhennia i vyrobnytstva [High-growing blueberry (Vaccinium corymbosum L.): biological features, introduction, varieties, reproduction and production technology]. Kyiv. 288 p. [in Ukrainian].

Burlaka, A.I. (2006). Efektyvnist intensyfikatsii yahidnytstva v Zakhidnomu rehioni Ukrainy [Effectiveness of intensification of berry growing in the Western region of Ukraine]. *Extended abstract of Candidate's thesis.* Zhytomyr, 20 p. [in Ukrainian].

Halatovych, Ye. (2019). Yahidnytstvo: problemy ta perspektyvy [Berry growing: problems and prospects]. *Propozytsiia [Offer].* [Electronic resource] URL: https://propozitsiya.com/ua/yagidnictvo-problemi-ta-perspektivi (access date 12.03.2019) [in Ukrainian].

Yeshchenko, V.O., Kopytko, P.H., Kostohryz, P.V., & Opryshko, V.P. (2014). Osnovy naukovykh doslidzhen v ahronomii [Basics of scientific research in agronomy]. Vinnytsia, 332 [in Ukrainian].

Poperechna, O. (2020). Lokhyna – yahoda № 1 v Ukraini [Lokhina is the number 1 berry in Ukraine]. *Yahidnyk [Patch of berries],* 1, 19–21 [in Ukrainian].

Rentabelnist orhanichnykh yahid siahaie 200% (2016). [The profitability of organic berries reaches 200%]. *Agroexpert.* 4 (93). [Electronic resource] URL: http://www.agroexpert.ua.../rentabelnist-organichnikh-jagid-sjagaje-200.html (access date 12.10.2024) [in Ukrainian].

Rozhko, I.S. (2019). Osnovopolozhni zasady yahidnytstva [Basic principles of berry growing]. *Visnyk LNAU [Bulletin of LNAU],* 23, 124–128 [in Ukrainian].

Savenko, H.Ye. (2017). Rozvytok rynku produktsii yahidnykh kultur Ukrainy v umovakh yevrointehratsii [Market development of berry crops of Ukraine in the conditions of European integration]. *Naukovyi visnyk Mizhnarodnoho humanitarnoho universytetu [Scientific Bulletin of the International Humanitarian University],* 23(1), 132–135. [Electronic resource] URL: http://nbuv.gov.ua/ UJRN/ Nvmgu_ eim_2017_23(1)__30 (access date 12.10.2024) [in Ukrainian].

Savina, O.I., Popovych, H.B., Sheidyk, K.A., & Zozulia, I.Iu. (2024). Formuvannia produktyvnosti lokhyny za riznykh sposobiv mulchuvannia [Formation of blueberry productivity by different methods of mulching]. *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal «Hral nauky» [International scientific journal «Grail of Science»],* 37, 155–160. https://doi.org/10.32782/2415-8240-2024-104-1-136-148 [in Ukrainian].

Shevchuk, M., & Ostapchuk, I. (2019). Produktyvnist sortiv lokhyny vysokorosloi (V.X. covilleanum) v umovakh zymovykh teplyts [Productivity of tall blueberry varieties (V.X. covilleanum) in winter greenhouses]. *Naukovyi visnyk Skhidnoievropeiskoho natsionalnoho universytetu im. L. Ukrainky [Scientific Bulletin of the East European National University named after L. Ukrainka],* 4(388), 40–43. https://doi.org/10.29038/2617-4723-2019-388-4-57-62 [in Ukrainian].

Shevchuk, M.Y., & Bortnik, TP. (2017). Lokhyna vysoka [The hollow is high]. Lutsk : PP Ivaniuk. 230 p. [in Ukrainian].

Отримано: 06.11.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

УДК 633.11:631.426.3:631.67
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.12

ЕКОНОМІЧНА ТА ЕНЕРГЕТИЧНА СКЛАДОВІ ВИРОЩУВАННЯ СОРТІВ КАРТОПЛІ ЗА ВИКОРИСТАННЯ РЕГУЛЯТОРІВ РОСТУ РОСЛИН ТА РІЗНИХ СТРОКІВ САДІННЯ

Я. Ю. Марценюк[1], Н. А. Захарчук[2], О. А. Зінченко[3]

На сучасному етапі розвитку картоплярства в Україні акцент на інтенсифікації технологій вирощування з урахуванням кліматичних змін має велике значення. Використання регуляторів росту нового покоління та оптимізація строків садіння забезпечують збільшення врожайності та покращення якості продукції при мінімальних економічних та енергетичних витратах, що є особливо актуальним в умовах обмеженого фінансового забезпечення.
Для досягнення мети дослідження, що полягала в економічній та енергетичній оцінці впливу регуляторів росту та строків садіння на врожайність різних сортів картоплі, було використано польові, лабораторні, аналітичні та математично-статистичні методи. Результати, отримані в умовах Південного Полісся України, показали, що найвищий економічний ефект забезпечує садіння сорту Радомисль 13–15 квітня та сорту Мирослава 25–27 квітня з обробкою бульб регулятором росту Картоплекс.
Ці заходи сприяли формуванню врожаю сорту Мирослава на рівні 41,5 т/га, що забезпечило умовний чистий прибуток у розмірі 151356 грн з 1 га посівної площі при рентабельності 68,3% і собівартості 7822 грн/т. Для сорту Радомисль врожайність склала 31,6 т/га, умовний чистий прибуток – 93556 грн/га, рентабельність – 40,6%, а собівартість – 7296 грн/т.
На енергетичну ефективність вирощування картоплі різних груп стиглості суттєво впливали строки садіння та використання регуляторів росту. Найвищий коефіцієнт енергетичної ефективності було відзначено для варіантів із зазначеними строками садіння та регулятором росту Картоплекс: для сорту Мирослава – 1,83, а для сорту Радомисль – 1,67.

Ключові слова: *картопля, регулятори росту, собівартість, рентабельність, біоенергетична ефективність, коефіцієнт енергетичної ефективності.*

[1] аспірант
(Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН, м. Київ)
E-mail: yaros1996@meta.ua
ORCID: 0000-0002-8457-3759
[2] кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник, учений секретар
(Інститут картоплярства НААН, смт. Немішаєве)
E-mail: vs_potato@meta.ua
ORCID: 0000-0002-8194-2491
[3] кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник, учений секретар
(Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН, м. Київ)
E-mail: org.sugarbeet@ukr.net
ORCID: 0000-0002-1381-8659

ECONOMIC AND ENERGY COMPONENTS OF POTATO VARIETY CULTIVATION USING PLANT GROWTH REGULATORS AND DIFFERENT PLANTING TIMES

Ya. Yu. Martseniuk, N. A. Zakharchuk, O. A. Zinchenko

At the current stage of potato farming development in Ukraine, the focus on intensifying cultivation technologies with consideration for climate change is highly significant. The use of new-generation growth regulators and optimization of planting times ensures increased yields and improved product quality with minimal economic and energy costs, which is especially relevant in conditions of limited financial resources.

To achieve the research objective, which involved the economic and energy assessment of the impact of growth regulators and planting dates on the yield of different potato varieties, field, laboratory, analytical, mathematical and statistical methods were employed. The results obtained in the conditions of Southern Polissia, Ukraine, demonstrated that the highest economic effect was achieved by planting the Radomysl variety between April 13–15 and the Myroslava variety between April 25–27, with tubers treated with the growth regulator Kartoplex.

These measures led to the formation of a yield of the Myroslava variety at 41.5 tons per hectare, providing a conditional net profit of UAH 151,356 per hectare of sown area, with a profitability of 68.3% and a cost of UAH 7,822 per ton. For the Radomysl variety, the yield reached 31.6 tons per hectare, with a conditional net profit of UAH 93,556 per hectare, profitability of 40.6%, and a cost of UAH 7,296 per ton.

The timing of planting and the use of growth regulators significantly influenced the energy efficiency of growing potato varieties with different maturity groups. The highest energy efficiency coefficient was observed for the variants with the specified planting dates and the growth regulator Kartoplex: 1.83 for the Myroslava variety, and 1.67 for the Radomysl variety.

Key words: *potatoes, growth regulators, cost, profitability, bioenergy efficiency, energy efficiency ratio.*

Вступ

Картопля та картопляні продукти міцно закріпились в раціоні харчування в усьому світі, посідаючи четверте місце за обсягами виробництва після кукурудзи, рису та пшениці. Ця культура є основним джерелом харчування для мільйонів людей, а для України, під час війни, вона набуває неабиякого значення для продовольчої безпеки країни (Pysarenko et al., 2024). Всім відомо, що саме картопля є «другим хлібом» українців. Саме поняття «другий хліб» виникло в Європі за часів Другої світової війни, коли зернові культури були знищені ворожою технікою та пожежами. Натомість картопля, навіть після проходу гусеничної техніки, зберігалась, завдяки чому Європі вдалось уникнути голоду. Реалії доводять, що Україна сьогодні знаходиться в аналогічних умовах: війна, обстріли, деокуповані та не повністю розміновані землі. В Україні за даними Державної статистики (Статистичний ..., 2023) споживання картоплі є досить високим і становить 132 кг на одну особу в рік, тоді як світове споживання картоплі на одну особу складає 33 кг, у країнах Європи даний показник становить 72 кг (Eurostat, 2022).

За даними ФАО (FAO: Doubling ..., 2022) у 2022 загальне світове виробництво картоплі оцінювалось в 375 млн тонн. Площі насаджень становили 17,7 млн га, а середня урожайність склала 21,1 тонн/га. Слід відмітити, що світове виробництво картоплі за період 2017–2022 років скоротилось на 13,3 млн тонн. У країнах ЄС у 2022 році виробництво картоплі було на рівні 48 млн тонн на площах понад 1,4 млн га за середньої урожайності 34,3 тонн/га (Eurostat, 2022). Україна у світовому рейтингу, за виробництва понад 20 млн тонн, посідає третю сходинку, що становить близько 6% валового виробництва картоплі у світі (Фурдига та ін., 2024).

Варто відмітити, що не зважаючи на високий рівень виробництва картоплі в країні, наразі воно зосереджене на 98% в домогосподарствах на невеликих площах із застосуванням ручної праці, а матеріально-технічне забезпечення галузі знаходиться в незадовільному стані. Картопля при вирощуванні є однією з найбільш ресурсоємних культур і вимагає в порівнянні з іншими сільськогосподарськими культурами більше капіталовкладень.

Матеріал і методи

Дослідження проводилися на базі чотирипільної технологічної сівозміни з основною культурою картоплі на землях Інституту кар-

топлярства, що знаходиться смт. Немішаєве Бучанського району Київської області.

Ґрунт дослідної ділянки – дерново-підзолистий супіщаний, типовий для зони Полісся України. Вміст гумусу в ґрунті орного шару складає 1,4%, азоту легкогідролізованого – 98, рухомого фосфору – 72, обмінного калію – 100 мг/кг, кальцію і магнію відповідно 4,4 та 0,5 мг екв на 100 г ґрунту; гідролітична кислотність Нг – 1,97, рН – 5,2 (Аналіз ґрунту виконаний Київським державним проектно-технологічним центром 11.02.2020р. № 87).

Попередник – озиме жито. Внесено добрива локально (в рядки) YaraMila COMPLEX 12-11-18 – 350 кг/га. Міжрядний обробіток (лапа + сітка). Обробіток проти бур'янів проведено з використанням Квінстар – 1 л/га + Тівітус 0,05 кг/га Захист проти колорадського жука проводили з використанням препарату Кораген 20 КС 60 мл/га.

Дослідження проводили з надраннім сортом Радомисль та середньостиглим сортом Мирослава за трьох строків садіння: перший 13–15.04, другий 25–27.04, третій 7–9.05.

Радомисль. Надранній сорт, столового використання. Можлива урожайність 38,0–40,0 т/га. Висока товарність бульб. Під час підкопування на 60-й день від садіння урожай становить 9,0–11,0 т/га. Комерційно привабливий для ранньої продукції. Смакові якості добрі. Вміст крохмалю 11,0–13,0%. Стійкий проти раку картоплі, іржавості бульб і хвороб виродження. Середньо стійкий проти парші звичайної і стеблової нематоди. Стійкий до посухи і високих температур.

Завдяки ніжно-рожевому кольору бульби, світло-жовтому м'якушу та округло-овальній формі з поверхневими вічками має гарні товарні якості. Кущ середньої висоти, добре облиствлений, квітка червоно-фіолетова. Придатний для вирощування двоурожайною культурою на півдні України та на всіх типах ґрунтів.

Мирослава. Середньостиглий сорт, столового призначення. Урожайність: в кінці вегетації 60,0–70,0 т/га. Вміст крохмалю 17,2%. Середня кількість бульб під кущем 18–21. Смакові якості 8,4 бала.

Морфологічні ознаки: бульби рожеві, овальної форми, м'якоть світло-жовтого кольору.

Стійкий до звичайного біотипу раку і золотистої картопляної цистоутворюючої нематоди, альтернаріозу, відносно стійкий до стеблової нематоди. Посухостійкий. Придатний для вирощування двоврожайною культурою. Рекомендується для вирощування в зонах Полісся та Лісостепу.

Занесений до Державного реєстру сортів рослин, придатних до поширення в Україні з 2018 року.

Загальна площа під посівом 0,27 га (перший, другий та третій строки садіння по 0,09 га), облікова площа ділянки 22,5 м^2. Повторення триразове, ділянки чотирьохрядкові.

Дослід закладали за схемою:

Контроль – обприскування водою.

1. Фітосубтил – обприскування бульб та борозн при садінні + позакоренево два рази впродовж вегетації у фази бутонізації та квітування.

2. Інтра Селл® – обробіток позакоренево два рази впродовж вегетації у фази бутонізації та квітування.

3. Картоплекс – обробіток бульб та борозн при садінні.

На всіх варіантах фоном йшло обприскування бульб, під час садіння, препаратом Селест Топ (0,9 л/т).

ФІТОСУБТИЛ для обробки коренеплодів та картоплі перед закладенням їх на тривале зберігання, що містить культуральну рідину і біомасу штамів бактерій *Bacillus amyloliquefaciens УКМ В 5139* та *Bacillus amyloliquefaciens УКМ В 5140*, які є продуцентами антибіотиків та фунгіцидів. Штами-продуценти отримано в Інституті мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України шляхом спрямованої селекції.

Поєднання вказаних штамів мікроорганізмів 1:1 забезпечує отримання ефективної композиції щодо захисту від гнилей під час тривалого зберігання. Отриманий біопрепарат дозволяє значно збільшити тривалість зберігання продукції. Слід зазначити, що такий синергічний ефект виявляється при значному зниженні титру мікроорганізмів у біопрепараті.

Біопрепарат отримано шляхом глибинного культивування штамів бактерій *Bacillus amyloliquefaciens УКМ В 5139* та *Bacillus amyloliquefaciens УКМ В 5140* на типовому для них середовищі. Для приготування біопрепарату змішували компоненти композиції, використовуючи культуральну рідину штамів бактерій Bacillus *amyloliquefaciens УКМ В 5139* та Bacillus *amyloliquefaciens УКМ В 5140* в співвідношенні 1:1. Отриману композицію пере-

мішували і зберігали при температурі 0–20 ^{0}C.

ІНТРАСЕЛЛ® – Ефективний контроль різноманітних стресових ситуацій (заморозки, засуха, спека тощо). Збереження вологи, макро- і мікроелементів у рослинах. Контроль гнилей за зберігання. Стимулятор росту, осмопротектор, який відновлює осмотичний баланс у середині клітин і тканин рослини.

Гліцинбетаїн – натуральна природна сполука, що міститься в цитоплазмі рослин: запобігає розтріскуванню ягід і плодів, особливо в умовах стресу, таким чином не дає проникнути фітопатогенним грибам в середину плоду та викликати його псування; сприяє нормальному метаболізму всередині рослин та збереженню кліткової енергії; стимулює розвиток коріння; тривала дія – після застосування ІнтраСелл® ефективний протягом 3–4 тижнів; значно подовжує дію фунгіциду при останньому внесенні для контролю гнилей при зберіганні.

Підсилює фотосинтез і фіксацію азоту; поліпшує здатність рослини до мобілізації мікроелементів; природний і екологічно безпечний.

Механізм дії: Гліцинбетаїн представляє собою N-три-метильовану амінокислоту. Будучи природною сполукою, яка продукується самою рослиною в хлоропластах та зберігається в цитоплазмі, гліцинбетаїн є визнаним осмолітиком, тобто речовиною, яка допомагає рослині зберігати воду, мікро- та макроелементи в умовах стресу (заморозки, засуха, сильний вітер, спекато що).

Застосування ІнтраСелл® в поєднанні з рідкими азотними добривами, кальцієм і мікроелементами в складі, сприяє кращому їх засвоєнню, а отже більшій ефективності. Поєднання хімічних фунгіцидів та ІнтраСелл® дозволяє найбільш ефективно та з мінімальним ризиком контролювати гнилі під час зберігання.

КАРТОПЛЕКС. Діюча речовина: міцелій та спори ґрунтових ендофітних грибів *Beauveria bassiana, Metarhizium robertsii* та бактерій *Bacillus megaterium, Bacillus azotofixans* з титром не менше 1,5x10^9 спор/г та продукти їх метаболізму. Комплекс ентомотоксинів та ад'ювантів біологічного походження. Забезпечує стимуляцію процесів росту рослини, формування потужної кореневої системи та укорінення розсади, збільшує площу живлення рослин. Сприяє активізації фотосинтетичної активності оброблюваних рослин – збільшує вміст хлорофілів на 10–24% загальної площі фотосинтетичної поверхні до 12%.

Підвищує стійкість рослин до впливу несприятливих факторів довкілля (посуха, екстремальні температури тощо), а також знижує фітотоксичний ефект від використання хімічних ЗЗР (гербіцидів та фунгіцидів). Забезпечує захист рослин від комплексу кореневих гнилей (фузаріозної, ризоктоніозної та бактеріальної). Підвищує врожайність картоплі на 12–30%. Додатково сприяє захисту рослин від комплексу ґрунтообробних шкідників: капустянки, дротівників, личинок хруща, колорадського жука, підгризаючих совок, і шкідників, що зимують у ґрунті.

Дослідження проводили у відповідності до Методичних рекомендацій «Картоплярство: методика дослідної справи» (Бондарчук та ін., 2019).

Результати

Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності, зокрема, витрати на вирощування, використали з технологічної карти. Умовну виручка від реалізації картоплі розраховували виходячи з цін, що склались на 1 грудня 2023 року.

Результати аналізу свідчать, що всі фактори досліду впливали на економічні показники вирощування картоплі.

З урахуванням виробничих витрат на вирощування культури та одержання чистого прибутку можна зазначити, що найменш затратним агрозаходом було впровадження різних строків садіння. За вирощування надраннього сорту Радомисль найвища вартість валової продукції з 1 га – 74300 грн/га була одержана за садіння 13–15.04 (перший строк), найнижча собівартість 1 т бульбового матеріалу 9135 грн була встановлена також на даному варіанті (табл. 1). За другого строку садіння (25–27.04) вартість одержаної продукції зменшилась на 8900 грн/га, а собівартість зросла до 10808 грн. Третій строк садіння (7–9.05) характеризувався найнижчими показниками – вартість одержаної продукції була на рівні 63300 грн/га, собівартість – 12789 грн. Підсумковий показник економічної ефективності – рівень рентабельності складав 32,3; 28,4; 27,5% відповідно.

Показники валової продукції середньостиглого сорту Мирослава були вищими порівняно з сортом Радомисль на 10385–36420 грн/га. Найнижчий показник собівартості відмічено за другого терміну садіння 6394 грн, рівень рентабельності при цьому був найвищий 48,1% (табл. 2).

Таблиця 1

Економічна ефективність застосування регуляторів росту за різних строків садіння, сорт Радомисль

Варіант	Урожайність, т/га	Вартість урожаю, тис. грн./га	Затрати на 1га, тис. грн	Умовно-чистий прибуток з 1га, тис. грн	Собівартість 1т урожаю, тис. грн	Рентабельність, %
Контроль						
13–15.04	25,2	304,50	230,200	74,300	9,135	32,3
25–27.04	21,3	295,60	230,200	65,400	10,808	28,4
7–9.05	18	293,50	230,200	63,300	12,789	27,5
Фітосубтил						
13–15.04	30,1	315,40	230,528	84,872	7,659	36,8
25–27.04	26,0	314,20	230,528	83,672	8,866	36,3
7–9.05	21,9	312,10	230,528	81,572	10,526	35,4
ІнтраСелл®						
13–15.04	30,4	319,50	231,064	88,436	7,601	38,3
25–27.04	27,2	319,20	231,064	88,136	8,495	38,1
7–9.05	22,1	313,40	231,064	82,336	10,455	35,6
Картоплекс						
13–15.04	31,6	324,10	230,544	93,556	7,296	40,6
25–27.04	29,1	322,90	230,544	92,356	7,922	40,1
7–9.05	23,2	319,40	230,544	88,856	9,937	38,5

Таблиця 2

Економічна ефективність застосування регуляторів росту за різних строків садіння, сорт Мирослава

Варіант	Урожайність, т/га	Вартість урожаю, тис. грн./га	Затрати на 1га, тис. грн	Умовно-чистий прибуток з 1га, тис. грн	Собівартість 1т урожаю, тис. грн	Рентабельність, %
Контроль						
13–15.04	35,1	332,40	230,200	102,197	6,558	44,4
25–27.04	36,0	340,92	230,200	110,720	6,394	48,1
7–9.05	32,3	305,88	230,200	75,681	7,127	32,9
Фітосубтил						
13–15.04	36,4	344,708	230,528	114,180	6,333	49,5
25–27.04	39,1	370,277	230,528	139,749	5,896	63,1
7–9.05	33,9	321,033	230,528	90,505	6,800	39,3
ІнтраСелл®						
13–15.04	37,2	352,284	231,064	121,220	6,211	52,5
25–27.04	39,8	376,906	231,064	145,842	5,806	60,6
7–9.05	35,2	333,344	231,064	102,280	6,564	44,3
Картоплекс						
13–15.04	40,1	324,10	230,544	123,556	8,112	54,2
25–27.04	41,5	322,90	230,544	151,356	7822	63,8
7–9.05	36,2	319,40	230,544	93,156	8,154	47,2

Застосування регуляторів росту в дослідженнях не мали значного впливу на додаткові витрати і становили всього 0,3–0,6%, сортові відмінності взагалі не впливали не витрати.

За обробки бульб та рослин картоплі впродовж вегетаційного періоду регулятором росту Фітосубтил чистий прибуток у сорту Радомисль відповідно склав 81572–84872 грн/га, собівартість – 7659–10526 грн/т у залежності від строку садіння. У сорту Мирослава дані показники були 90505–139749 грн/га та 5,896–6,800 грн/т відповідно. Використання регулятору росту ІнтраСелл® за вирощування сорту Радомисль дало змогу одержати чистий прибуток з одного гектара у межах 82336–88436 грн, сорту Мирослава – 102280–145842 грн, при цьому собівартість складала 7601–10,455 (Радомисль) та 5806–6564 (Мирослава) грн.

Найвищу собівартість ми відмічали незалежно від варіанту за третього строку садіння, при цьому рентабельність була в межах 35,3–35,6% , у контролі 27,5%.

У сорту Радомисль найнижча собівартість – 1 т продукції отримана на варіанті з використанням регулятору росту Картоплексу та першого терміну садіння – 7296 грн. На цьому ж варіанті ми отримали найбільший чистий прибуток 93556 тис. грн, при цьому рівень рентабельності складав 40,5%.

За вирощування сорту Мирослава найбільший чистий дохід теж отримано на варіанті, де застосовували Картоплекс, проте за другого строку садіння – 151356 грн та найвищий рівень рентабельності виробництва – 63,8%. При цьому собівартість продукції складала 7822 грн. Слід зазначити, що цей варіант був найкращим з-поміж усіх досліджуваних варіантів.

Отже, за рахунок регулювання факторів впливу на продуктивність картоплі та на основі показників економічної ефективності було визначено оптимальні параметри вирощування сортів різних груп стиглості. Порівнюючи економічну ефективність сортів, слід зазначити, що вирощування сорту Мирослава забезпечує вищий економічний ефект, ніж сорт Радомисль.

У світовій практиці поряд з традиційними методами оцінки ефективності виробництва сільськогосподарської продукції з урахуванням грошових та трудових показників велике значення має метод енергетичної оцінки, який базується як на фіксуванні кількості енергії, що витрачається на виробництво сільськогосподарської продукції, так і акумульованої в даній продукції енергії. Цей метод дозволяє найбільш точно враховувати і відображати у відповідних енергетичних еквівалентах не лише витрати енергії живої і упредметненої праці на технологічні операції, а й енергію, що втілена в одержаній продукції. Визначення балансу енергії, як різниці між затраченою та одержаною, дає можливість у кількісних одиницях визначити енергетичну ефективність вирощування сільськогосподарських культур, оцінити різні агротехнологічні заходи та виявити резерви енергії в землеробстві.

Ціллю біоенергетичної оцінки ефективності використання регуляторів за різних строків садіння є визначення окупності сукупних енерговитрат на вирощування картоплі енергією, яка міститься у врожаї сортів Радомисль та Мирослава. Для обліку сукупної енергії, витраченої на виробництво продукції, використовують енергетичні еквіваленти, тобто кількість енергії в джоулях (або калоріях), необхідної для виконання певного роду робіт. Великі енергетичні затрати за вирощування картоплі припадають на насіння, добрива, паливно-мастильні матеріали, садіння, обробіток ґрунту та збирання врожаю (табл. 3).

Аналіз енергетичної структури затрат за вирощування досліджуваних сортів картоплі свідчить, що найбільший відсоток затрат припадає на насіння – 25,1%, пестициди – 17,2%, мінеральні добрива – 12,5%, на ПММ – 15,9% і працю – 8,8%. Затрати на використання регуляторів росту рослин – 1,9%.

Енергоємність 1 тонни бульб визначалась з урахуванням в бульбах картоплі сухої речовини і крохмалю, оскільки ці показники знаходяться в тісній кореляційній залежності. На основі енергоємності однієї тонни бульб визначали вихід енергії з 1 га. Оцінку затрат на нагромадження енергії господарсько-цінною частиною врожаю картоплі проводили в МДж з наступним визначенням коефіцієнту енергетичної ефективності – Кее.

Так для сорту картоплі Радомисль у контрольному варіанті за різних строків садіння витрачали енергії складали 45945–69173 МДж/га, у варіантах за використання регулятору росту Фітосубтил вони були у межах від 54066 до 84000 МДж/га, ІнтраСелл® – від 57640 до 82821 МДж/га, Картоплекс – від 50291 до 78780 МДж/га. Енергоємність отри-

Таблиця 3

Енергетична структура затрат у розрахунку на 1 га посіву за технології Інституту картоплярства НААН, 2023 р.

Показник	**Енергоємність у**	
	мДж	**%**
Механізми, кг	18453,9	17,50
Паливо-мастильні матеріали	16776,7	15,9
Електроенергія, кВт/год	8436,8	0,80
Добрива мінеральні, кг	13181,3	12,5
Регулятори росту	2003,6	1,9
Пестициди, кг	18137,6	17,20
Насіння, кг	26468,2	25,1
Праця, люд./год	9279,7	8,80
Всього	105451	100,00

маного врожаю на контрольному варіанті складала 54216–92000 МДж/га, а у варіантах за використання регулятору росту Фітосубтил вони були у межах від 69204 до 127680 МДж/га, ІнтраСелл® – від 74698 до 129200 МДж/га, Картоплекс – від 50291 до 131564 МДж/га і була більшою відповідно на 8270–84000 МДж (табл. 4).

За вирощування сорту картоплі Мирослава у контрольному варіанті за різних строків садіння витрачали енергії 93082–99192 МДж/га, у варіантах за використання регулятору росту Фітосубтил вони були у межах від 96847 до 113000 МДж/га, ІнтраСелл® – від 96011 до 118940 МДж/га, Картоплекс – від 100878 до 105541 МДж/га. Енергоємність отриманого врожаю на контрольному варіанті складала 122869–155520 МДж/га, а у варіантах за використання регулятору росту Фітосубтил вони були у межах від 156892 до 175794 МДж/га, ІнтраСелл® – від 160339 до 181607 МДж/га, Картоплекс – від 174484 до 192975 МДж/га. Найвищий показник енергоємності відзначено за другого строку садіння та використання регулятору росту Картоплекс для обробки бульб, що на 24% перевищував контроль. Зазначені показники свідчать про ефективність досліджуваних агрозаходів.

Витрати сукупної енергії за технології вирощування картоплі з використанням регуляторів росту збільшилися як за рахунок виробничих витрат на застосування препаратів, так і за рахунок витрат на збирання та транспортування додатково одержаного врожаю.

Проведений нами аналіз енергетичної ефективності свідчить, що використання регуляторів росту рослин Фітосубтил, ІнтраСелл® та Картоплекс як за обробки бульб, так і впродовж вегетації, призводить до зростання коефіцієнта енергетичної ефективності. Залежно від строків садіння змінювалась лише величина Кее, а тенденція щодо зростання показника зберігалась незалежно від сортових особливостей.

У контрольному варіанті за першого строку садіння картоплі Кее становив у сорту Радомисль – 1,33, у сорту Мирослава – 1,54. У варіанті з застосуванням Фітосубтилу коефіцієнт енергетичної ефективності зростав до 1,52 у сорту Радомисль та 1,62 у сорту Мирослава. За другого строку садіння Кее порівняно з контролем (1,27) зріс до 1,3 у сорту Радомисль та 1,71 сорту Мирослава (контроль 1,63), за третього строку садіння відзначено зростання до 1,28 та 1,44 відповідно у контролі показники становили 1,18 і 1,32.

Застосування ІнтраСелл® призводило до збільшення Кее у сорту Радомисль – до 1,56 (перший строк садіння), 1,38 (другий строк строк садіння) та 1,30 (третій строк садіння). У сорту Мирослава показники були дещо вищими та становили відповідно 1,67, 1,74 та 1,51.

Найвищі значення Кее було встановлено за використання регулятора росту Картоплекс: сорт Радомисль (I, II, II строки садіння) – 1,67; 1,62; 1,58, сорт Мирослава – 1,76; 1,83; 1,73.

Обговорення

Щоб виробництво картоплі було максимально ефективним, необхідне постійне вдосконалення технології її вирощування з урахуванням ґрунтових умов, сортових особливостей тощо. Головною умовою застосування того чи іншого агрозаходу є збільшення врожайності та зменшення витрат

Таблиця 4

Біоенергетична ефективність вирощування сортів картоплі залежно від застосування регуляторів росту та строків садіння, 2023 р.

Варіант досліду	**Урожайність, т/га**	**Енергоємність урожаю картоплі, МДж**	**Витрати енергії на вирощування, МДж,га**	**Приріст енергії, МДж,га**	**Коефіцієнт енергетичної ефективності Кее**	**Урожайність, т/га**	**Енергоємність урожаю картоплі, МДж**	**Витрати енергії на вирощування, МДж,га**	**Приріст енергії, МДж,га**	**Коефіцієнт енергетичної ефективності Кее**
	Сорт Радомисль					Сорт Мирослава				
Строк садіння 13–15.04										
Контроль	25,2	92000	69173	22827	1,33	35,1	152755	99192	53563	1,54
Фітосубтил	30,1	127680	84000	43680	1,52	36,4	156892	96847	60045	1,62
ІнтраСелл®	30,4	129200	82821	46379	1,56	37,2	160339	96011	64328	1,67
Картоплекс	31,6	131564	78780	52783	1,67	40,1	180851	102756	78095	1,76
Строк садіння 25–27.04										
Контроль	21,3	72846	57359	15486	1,27	36,0	155520	95401	60109	1,63
Фітосубтил	26,0	97500	75000	22500	1,30	39,1	175794	102803	72991	1,71
ІнтраСелл®	27,2	102816	74504	28312	1,38	39,8	181607	104372	772035	1,74
Картоплекс	29,1	119019	73469	45550	1,62	41,5	192975	105451	87524	1,83
Строк садіння 25–27.04										
Контроль	18,0	54216	45945	8270	1,18	32,3	122869	93082	29786	1,32
Фітосубтил	21,9	69204	54066	15138	1,28	33,9	162720	113000	49720	1,44
ІнтраСелл®	22,1	74698	57640	17238	1,30	35,2	168960	118940	57066	1,51
Картоплекс	23,2	79460	50291	29129	1,58	36,2	174484	100878	73626	1,73

на вирощування. Застосування органічних і мінеральних добрив, сучасних регуляторів росту рослин та пестицидів поряд з іншими агротехнічними заходами під час вирощування сільськогосподарської продукції завжди було найефективнішим фактором підвищення врожаю, а отже і одержання прибутку з одиниці площі. Економічна оцінка в умовах ринкових відносин є обов'язковою умовою, особливо з урахуванням значного підвищення цін на добрива, паливно-мастильні матеріали, засоби захисту (Кабанець та ін., 2021).

Впродовж останніх років у зв'язку зі швидким зростанням вартості матеріальних ресурсів, збільшенням амортизаційних відрахувань, навіть з урахуванням росту урожайності, собівартість вирощування картоплі зростає (Балашова, 2020). Собівартість, яка фактично формує кінцеві результати реалізації, може знижуватись через не раціональне використання, в першу чергу садивного матеріалу, мінеральних чи органічних добрив, засобів захисту, палива та електроенергії (М'ялковський, 2018). Хоча картопля є високомаржинальною культурою, проте і дуже капіталомістка – у 2021 році середні витрати на вирощування одного гектару столової картоплі в сільськогосподарських підприємствах становили 120–150 тис. грн, а насіннєвої – 250 тис. грн. Середня рентабельність знаходилась на рівні 30%.

Енергетично сільське господарство – особлива форма діяльності суспільства з перетворення сонячної радіації в енергію хімічних і інших продуктів за допомогою рослин. Рослинні організми перетворюючи енергію сонця, накопичують її в хімічних зв'язках різноманітних сполук своїх тканин. Рослина – основа продуктивності сільського господарства, так як тільки в рослинах у доступних для людини формах проходить перетворення радіації в енергію хімічних зв'язків, придатну для використання іншими підсистемами і людиною (Kassali, 2011; Wu et al., 2024).

Підвищена увага до механізму трансформації енергії в землеробстві обумовлена постійним зростанням затрат енергії на виробництво одиниці продукції. В останнє сторіччя затрати сукупної енергії (енергетична ціна) на одержання 100 калорій продукції становили в 1928 р. – 48 кал., 1950 р. – 57 кал., 1960 р. – 70 кал., 1980 р. – 86 кал (Gelfand et al., 2010).

Зростання врожайності в США і країнах Західної Європи у 2–3 рази супроводжувалися ростом витрат непоновлювальної енергії (добрива, пестициди, зрошення, техніка та ін.) в 10–15 і навіть у 50 разів (Pimentel, 2019).

Постала необхідність пошуку шляхів і засобів підвищення продуктивності і одночасного зменшення затрат енергоресурсів на одержання одиниці продукції. Енергетичний аналіз структури витрат на вирощування сільськогосподарських культур і енергетична оцінка технології є важливою складовою їх комплексної оцінки та планування заходів щодо зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Енергетичний підхід дозволяє пов'язати в єдине ціле прояви хімічного, біологічного та соціального життя, екологічні й енергетичні поняття (Casado & de Molina, 2017).

Розробка заходів, які б забезпечували раціональне використання непоновлювальної енергії та підвищення економічної ефективності сільськогосподарського виробництва, повинна проводитись із застосуванням енергетичного аналізу технологій, який є більш конкретним і екологічним ніж, методика зведених грошових витрат.

Вирощування картоплі пов'язане зі значними енерговитратами, які зумовлюють низьку енергетичну ефективність виробництва і можуть призвести до надходження в агроекосистему кількості енергії понад допустимий рівень.

Наслідком є порушення основних властивостей агросистеми, зниження родючості ґрунту, забруднення водних джерел, повітря, а тому енергетичний аналіз та оцінка технологій вирощування культури і окремих заходів з метою зниження енергоємності продукції є важливим як в економічному, так і в екологічному відношенні.

Для ефективного використання ресурсів необхідно прагнути до підвищення урожайності і скорочення матеріальних витрат. Наукові розробки та передовий досвід показують, що значні резерви підвищення урожайності криються саме в енергоємних технологічних процесах (догляд, захист від хвороб і шкідників, післязбиральна доробка та зберігання садивного матеріалу). Так, Б. Періс з співавторами зазначають, що картопля є одним з основних коренеплодів, які вирощуються в ЄС, де у 2018 році під культуру було відведено 1,7 млн га площі. Картопляний сектор в Європі споживає близько 50,57 ПДж щорічно, при цьому добрива складають 38% усіх витрат енергії, споживання паливо-мастильних матеріалів – 30%. Мета-аналіз наведений у цьому дослідженні, показує, що

в середньому близько 29,61 ГДж споживається на гектар картоплі, вирощеної в ЄС. Основне споживання енергії припадає на добрива – 29%, на другій позиції йдуть інші (в основному зберігання) – 26%, використання ПММ – 25% (посів, догляд впродовж вегетації, збирання врожаю), насіння – 15%, пестициди – 5%. Проте автори вказують і на значні відмінності від зазначених вище показників, за використання зрошення, особливо у Південній Європі. Так, встановлено, що в Італії за вирощування картоплі зрошення становило 18%, в Греції на зрошення припадало 62% загального споживання енергії (Faostat, 2021; Paris et al., 2022).

Застосування нових систем обробітку ґрунту, сидеральних культур, використання нетоварної продукції попередника в якості органічного добрива, розширення міжрядь, зменшення норм садивного матеріалу та об'ємів транспортування підвищує енергетичний коефіцієнт майже вдвічі. Основним критерієм вибору найбільш ефективних заходів раціонального енерговикористання на практиці є енергетичний аналіз (Myronova et al., 2023).

Висновки

Результати досліджень в умовах Південного Полісся України доводять, що найвищий економічних ефект досягається за садіння 13–15 квітня надраннього сорту картоплі Радомисль та за садіння 25–27 квітня середньостиглого сорту Мирослава і обробки бульб регулятором росту Картоплекс. Дані агрозаходи забезпечили формування бульб у сорту Мирослава 41,5 т/га, отримання 151356 грн з 1 га посівної площі грн умовно чистого прибутку за рівня рентабельності 68,3% та собівартості 7822 грн/т; у сорту Радомисль – 31,6 т/га, 93556 грн/га умовно чистого прибутку, рентабельності 40,6% та собівартості 7296 грн/т. Розрахунки демонструють, що найсуттєвіший приріст енергії залежно від факторів, які вивчали, встановлено у варіанті за вирощування сорту Мирослава із застосуванням регулятору росту Картоплекс та другого строку садіння, де показник становив 87524 МДж, у контролі приріст складав 60109 МДж. Для сорту Радомисль кращим також був варіант за використання Картоплексу, але за першого терміну садіння – 52783 МДж, контроль 22827 МДж. Величина Кее у сорту Мирослава була у межах 1,44–1,83 залежно від строків садіння за значення у контролі 1,32–1,54, у сорту Радомисль 1,28–1,56, контроль – 1,18–67.

Список використаної літератури

Балашова Г.С., Юзюк С.М., Котова О.І., Юзюк О.О, Котов Б.С. Економічно-енергетична ефективність вирощування картоплі за краплинного зрошення в умовах Південного Степу. *Вісник аграрної науки.* 2020. Т. 98. № 8. С. 77–84 http://doi.org/10.31073/agrovisnyk2020008-10.

Бондарчук А.А., Колтунов В.А., Олійник Т.М. та ін. Картоплярство: Методика дослідної справи. За редакцією А. А. Бондарчука, В. А. Колтунова. Вінниця : ТОВ «ТВОРИ», 2019. 625 с.

Кабанець В.М., Оничко В.І., Музика Л.П., Бердін С.І. Сортова реакція на формування насіннєвої продуктивності при обробці посівів картоплі регуляторами росту. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія Агрономія і біологія.* 2022. Т. 45 № 3. С. 27–37. http://doi.org/10.32845/agrobio2021.3.4.

М'ялковський Р.О. Економічна та енергетична ефективність застосування добрив при вирощуванні картоплі в умовах Правобережного Лісостепу України. *Біоресурси і природокористування.* 2021. Т. 10. № 1–2. С. 94–100. http://dx.doi.org/10.31548/bio2018.01.012.

Статистичний щорічник України за 2022 рік / За ред. І. Є. Вернера. Київ : Державна служба статистики України, 2023. 383 с. [Електронний ресурс]. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2023/zb/11/year_22_u.pdf. (дата звернення 17.10.2024).

Фурдига М.М., Пономаренко М.Д., Таращенко В.А., Предно В.І. Проблеми та перспективи розвитку ринку картоплі в Україні в умовах карантинних та воєнних обмежень. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». Серія «Економічні науки».* 2024. № 4. Т. 1. С. 110–117. https://doi.org/10.25313/2520-2294-2024-4-9807.

Casado G.I.G., de Molina M.G. Energy in Agroecosystems: a tool for assessing sustainability. CRC Press. 2017. 470 p. https://doi.org/10.12001/g781315367040.

Eurostat. Agri-environmental indicator – energy use. 2022. [Електронний ресурс]. URL: https://ec.europa. eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Agri-environmental_indicator_-energy_use&oldid=322997#Analysis_at_EU_and_ country_ level (дата звернення 24.10.2024).

Eurostat . Agricultural production crops. Potatoes and sugar beet. 2022. [Електронний ресурс]. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statics-exlained/index.php?title (дата звернення 24.10.2024).

FAO. Faostat – energy use. 2021. [Електронний ресурс]. URL: https:// www.fao.org/faostat/en.

FAO: Doubling global potato production in 10 years is possible. 2022. [Електронний ресурс]. URL: https://www.fao.org/newsroom/detail/doubling-global-potato-production-in-10-years-is-possible/ (дата звернення 16.10.2024).

Gelfand I., Snapp Z.S., Robertson G.F. Energy Efficiency of Conventional, Organic and Alternative Cropping Systems for Food and Fuel at a Site in the U.S. Midwest. *Environmental Science & Technology.* 2010. Vol. 44. № 10. P. 4006–4011. https://doi.org/10.1021/es903385g.

Kassali R. Economics of Sweet Potato Production. *International Journal of Vegetable Science.* 2011. Vol. 17. № 4. P. 313–321. https://doi.org/10.1080/19315260.2011.553212.

Myronova H., Honcharuk I., Mazur O., Tkachuk O., Vradii O., Mazur O., Shkatula Y., Peleh L., Okrushko S. Optimization of measures to increase disease resistance of potato varieties as a factor of reducing environmental pollution. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science.* 2023. Vol. 13. № 2. P. 163−170. https://doi.org/10.31407/ijees13.218.

Paris B., Vandorou. F., Balafoutis, A.T., Vaiopoulos K., Kyriakarakos G., Manolakos D., Papadakis G. Energy use in open-field agriculture in the EU: A critical review recommending energy efficiency measures and renewable energy sources adoption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2022. Vol. 158. P. 112098. https://doi.org/10.10.1016/j.rser.2022.112098.

Pimentel D. Handbook of Energy Utilization in Agriculture. 2019. 488 p.CRC Press. https://doi.org/ 10.1201/9781351072519.

Pysarenko N., Zakharchuk N., Furdyha M., Oliinyk T. Influence of weather conditions in Central Polissia, Ukraine, on the expression of quality indicators in potato cultivars of different maturity groups. *Scientific Horizons.* 2024. Vol. 27. № 6. P. 1–62. https://doi.org/10.48077/scihor6.2024.51.

Wu X., Gong D., Zhao K., Chen D., Dong Y., Gao Y., Wang Q., Hao G.F. Research and development trends in plant growth regulators. *Advantes Agrochem.* 2024. https://doi.org/10.1016/ j.aas.2023.11.005.

References

Balashova, H.S., Yuziuk, S.M., Kotova, O.I., Yuziuk, O.O., & Kotov, B.S. (2020). Ekonomichno-enerhetychna efektyvnist vyroshchuvannia kartopli za kraplynnoho zroshennia v umovakh Pivdennoho Stepu. [Economic and energy efficiency of potato growing underdrop irrigationin the Southern Steppe]. *Vysnyk agrarnoi nayku [Bulletin of Agricultural Science]*, 98 (8), 77–84. http://doi.org/10.31073/agrovisnyk2020008-10 [in Ukrainian].

Bondarchuk, A.A., Koltunov, V.A., Oliynik, T.M., et al. (2019). Kartoplyarstvo: Metodika doslidnoyi spravi [Potato growing: Methods of research]. Vinnitsya : TVORI [in Ukrainian].

Kabanets, V.M., Onychko, V.I., Muzika, L.P., & Berdin, S.I. (2022). Sortova reaktsiia na formuvannia nasinnievoi produktyvnosti pry obrobtsi posiviv kartopli rehuliatoramy rostu [Variety response to the formation of the yield of clubs when treating potato crops with growth regulators]. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Seriia Ahronomiia i biolohiia [Bulletin of Sumy National Agrarian University. The series Agronomy and Biology*], 45 (3), 27–37. https://doi.org/ 10.32845/ agrobio.2021.3.4 [in Ukrainian].

Mialkovskyi, R.O. (2021). Ekonomichna ta enerhetychna efektyvnist zastosuvannia dobryv pry vyroshchuvanni kartopli v umovakh Pravoberezhnoho Lisostepu Ukrainy [Economic and energy efficiency of fertilizer application in growing potatoes in the conditions of the Right Bank Forest Steppe of Ukraine. *Bioresources and nature management [Bioresursy i pryrodokorystuvannia]*, 10 (1–2), 94–100. http://dx.doi.org/10.31548/bio2018.01.012 [in Ukrainian].

Verner, Ye. (Ed.) (2023). Statystychnyi shchorichnyk Ukrainy za 2022 rik [Statistical Yearbook of Ukraine for 2022]. Kyiv: Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. [Electronic resource]. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/ druk/publicat/ kat_u/2023/zb/11/year_22_u.pdf/ (access date 24.10.2024) [in Ukrainian].

Furdyha, M.M., Ponomarenko, M.D., Tarashchenko, V.A., & Predko, V.I. (2024). Problemy ta perspektyvy rozvytku rynku kartopli v Ukraini v umovakh karantynnykh ta voiennykh obmezhen [Problems and prospects of the development of the potato market in Ukraine in the conditions of quarantine and war restrictions]. *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal «Internauka». Seriia «Ekonomichni nauky» [International Scientific Journal "Internayka" Series: "Economic Scieces"],* 4(1), 110–117. https://doi.org/10.25313/2520-2294-2024-4-9807 [in Ukrainian].

Casado, G.I.G., & de Molina, M.G. (2017). Energy in Agroecosystens: a tool for assessing sustainability. CRC Press. https://doi.org/10.12001/g781315367040 [in English].

Eurostat. Agri-environmental indicator – energy use (2022). [Electronic resource]. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Agri-environ-mental_indicator_- energy_use&oldid=322997#Analysis_at_EU_and_ country_level (access date 24.10.2024) [in English].

Eurostat. Agricultural production crops. Potatoes and sugar beet. (2022). [Electronic resource]. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statics-exlained/ index. php? title (access date 24.10.2024) [in English].

FAO. Faostat – energy use. 2021. [Electronic resource]. URL: https://www.fao.org/faostat/en (access date 16.10.2024) [in English].

FAO: Doubling global potato production in 10 years is possible. 2022. [Electronic resource]. URL: https://www.fao.org/newsroom/detail/doubling-global-potato-produc-tion-in-10-years-is-possible/ (access date 16.10.2024) [in English].

Gelfand, I., Snapp, Z.S., & Robertson, G.F. (2010). Energy Efficiency of Conventional, Organic and Alternative Cropping Systems for Food and Fuel at a Site in the U.S. Midwest. *Environmental Science & Technology,* 44 (10), 4006–4011 https://doi.org/10.1021/es903385g [in English].

Kassali, R. (2011). Economics of Sweet Potato Production. *International Journal of Vegetable Science,* 17(4), 313–321. https://doi.org/10.1080/19315260.2011.553212 [in English].

Myronova, H., Honcharuk, I., Mazur, O., Tkachuk, O., Vradii, O., Mazur, O., Shkatula, Y., Peleh, L., & Okrushko, S. (2023). Optimization of measures to increase disease resistance of potato varieties as a factor of reducing environmental pollution. *International Journal of Ecosystems and Ecology*, 13 (2), 163−170. https://doi.org/10.31407/ijees13.218 [in English].

Paris, B., Vandorou. F., Balafoutis, A.T., Vaiopoulos K., Kyriakarakos G., Manolakos D., & Papadakis G. (2022). Energy use in open-field agriculture in the EU: A critical review recommending energy efficiency measures and renewable energy sources adoption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 158, 112098, 1–17. https://doi.org/10.10.1016/ j.rser.2022.112098 [in English].

Pimentel, D. (2019). Handbook of Energy Utilization in Agriculture. CRC Press. https://doi. org/10.1201/9781351072519 [in English].

Pysarenko, N., Zakharchuk, N., Furdyha, M., & Oliinyk, T. (2024). Influence of weather conditions in Central Polissia, Ukraine, on the expression of quality indicators in potato cultivars of different maturity groups. *Scientific Horizons,* 27(6), 51–62. https://doi.org/10.48077/ scihor6.2024.51 [in English].

Wu, X., Gong, D., Zhao, K., Chen, D., Dong, Y., Gao, Y., Wang, Q., & Hao, G.F. (2024). Research and development trends in plant growth regulators. *Advantes Agrochem.* https://doi.org/ 10.1016/ j.aas.2023.11.005 [in English].

Отримано: 01.11.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

УДК 633.88:631.582.1:58.084:851.524.1:582.998
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.13

БІОЛОГІЧНА АКТИВНІСТЬ ҐРУНТУ ТА ПРОДУКТИВНІСТЬ ЕХІНАЦЕЇ ПРИ ЇЇ ПОВТОРНОМУ ВИРОЩУВАННІ

С. В. Поспєлов[1], В. М. Самородов[2], В. В. Оніпко[3], Є. О. Зезекало[4]

Представники роду Echinacea Moench. більше 300 років успішно використовуються в світі завдяки своїм лікарським властивостям. Із трави та кореневищ з коренями виготовляють різноманітні лікарські препарати для людини і тварин, харчові добавки, корми тощо. Унікальний фітохімічний комплекс та відсутність побічних ефектів дозволяє виготовляти імуностимулюючі, протизапальні та противірусні препарати. В Україні введено в культуру два види: ехінацея пурпурова (Echinacea purpurea (L.) Moench.) та ехінацея бліда (Echinacea pallida (Nutt.) Nutt.), які успішно культивують в господарствах України. Незважаючи на тривалий період вивчення, деякі аспекти агротехнології ехінацеї потребують поглибленого дослідження. Один із них – повторні посіви. Метою наших досліджень було вивчення продуктивності і біологічної активності ґрунту в умовах повторних посівів ехінацеї пурпурової та ехінацеї блідої. Для цього були закладені досліди, в яких кожний вид вирощували два цикли по два роки (повторні посіви) та два роки ехінацею бліду після двох років ехінацеї пурпурової і навпаки. Оцінка біологічної активності ґрунту методом прямого біотестування на тестовій культурі свідчить, що повторне вирощування ехінацеї пурпурової викликало гальмування ростових процесів, а ехінацея бліда при вирощуванні після ехінацеї пурпурової позитивно вплинула на тестовий об'єкт. Визначення каталітичної активності ґрунту показує, що при вирощуванні ехінацеї блідої біологічна активність ґрунту була вищою за ехінацею пурпурову при різних схемах досліду. При повторному культивуванні ехінацеї пурпурової більш

[1] доктор сільськогосподарських наук, професор,
завідувач кафедри землеробства і агрохімії імені В.І. Сазанова
(Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава)
e-mail: sergii.pospielov@pdau.edu.ua
ORCID: 0000-0003-0433-2996
[2] доцент кафедри захист рослин
(Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава)
e-mail: zakhyst.roslyn@pdau.edu.ua
ORCID: 0000-0001-7088-6212
[3] доктор педагогічних наук,
професор кафедри землеробства і агрохімії імені В.І. Сазанова
(Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава)
e-mail: valentina.onipko@pdau.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2260-971X
[4] аспірант кафедри землеробства і агрохімії імені В.І. Сазанова
(Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава)
e-mail: yefim.zezekalo@pdau.edu.ua
ORCID: 0009-0007-2757-2139

високу активність каталази визначали весною, а влітку та восени – на ділянках, де вирощували ехінацею бліду. Проведені дослідження свідчать, що при повторному вирощуванні достовірно знижуються основні кількісні і якісні показники, що забезпечують формування продуктивності ехінацеї. У ехінацеї пурпурової утворюється менше листків на рослині (на 31,5 шт.), зменшуються маса рослини (на 43,3 г) та загальна площа фотосинтетичної поверхні (на 293,5 см²). Реакція ехінацеї блідої на повторне вирощування була негативною: маса рослини знизилася на 76,3 г, кількість листків – на 14,7 шт, суцвіть – на 5,1 шт., площа фотосинтетичної поверхні – на 18,05 см². Висловлюється припущення про алелопатичну складову зниження продуктивності ехінацеї в повторних посівах. Саме тому в господарствах, які вирощують лікарські рослини необхідно, не допускати тривалого вирощування ехінацеї на одному місці.

***Ключові слова**: ехінацея, Echinacea purpurea, Echinacea pallida, ботаніка, морфометричні показники, ґрунтознавство, біологічна активність ґрунту, лікарське рослинництво.*

BIOLOGICAL ACTIVITY OF SOIL AND PRODUCTIVITY OF ECHINACEA UNDER REPEATED CULTIVATION

S. V. Pospielov, V. M. Samorodov, V. V. Onipko, Ye. O. Zezekalo

Representatives of the genus Echinacea Moench have been successfully used worldwide for over 300 years due to their medicinal properties. Various medicinal preparations for humans and animals, dietary supplements, and feeds are made from the herb and rhizomes with roots. The unique phytochemical complex and the absence of side effects allow the production of immunostimulatory, anti-inflammatory, and antiviral drugs. In Ukraine, two species have been introduced into cultivation: Echinacea purpurea (L.) Moench and Echinacea pallida (Nutt.) Nutt., which are successfully cultivated on farms. Despite the long period of study, some aspects of Echinacea agronomy require further research. One of them is repeated cultivation. The aim of our research was to study the productivity and biological activity of the soil under conditions of repeated cultivation of Echinacea purpurea and Echinacea pallida. For this purpose, experiments were set up in which each species was grown in two cycles of two years (repeated cultivation) and two years of Echinacea pallida after two years of Echinacea purpurea and vice versa. The assessment of soil biological activity by direct biotesting on a test culture indicates that repeated cultivation of Echinacea purpurea inhibited growth processes, while Echinacea pallida, when grown after Echinacea purpurea, positively affected the test object. Determination of soil catalytic activity shows that when growing Echinacea pallida, the biological activity of the soil was higher than that of Echinacea purpurea under different experimental schemes. In repeated cultivation of Echinacea purpurea higher catalase activity was determined in spring, while in summer and autumn, it was higher in plots where Echinacea pallida was grown. The conducted studies indicate that with repeated cultivation, the main quantitative and qualitative indicators that ensure the formation of Echinacea productivity significantly decrease. Echinacea purpurea formed fewer leaves per plant (by 31.5 pcs.), plant mass (by 43.3 g), and total photosynthetic surface area (by 293.5 cm²). The response of Echinacea pallida to repeated cultivation was negative: plant mass decreased by 76.3 g, the number of leaves by 14.7 pcs., inflorescences by 5.1 pcs., and photosynthetic surface area by 18.05 cm². It is suggested that the allelopathic component contributes to the decrease in Echinacea productivity in repeated cultivation. Therefore, in farms growing medicinal plants, it is necessary to avoid prolonged cultivation of Echinacea in one place.

***Key words**: Echinacea purpurea, Echinacea pallida, botany, morphometric indicators, soil science, biological activity of soil, medicinal plant cultivation.*

Вступ

Виробництво лікарської сировини в світі динамічно розвивається, забезпечуючи населення Землі якісними натуральними фітопрепаратами та продуктами переробки лікарських рослин (Вожегова та ін., 2021). В Україні існують давні традиції їх вирощування та заготівлі в природі. Ще в 1916 р. на Полтавщині була заснована Дослідна станція лікарських рослин, де були започатковані комплексні наукові дослідження, що дозволило в короткий термін вирішити питання інтродукції, акліматизації, технології вирощування і збирання, селекції, фітохімії важливих для фармацевтики рослин та впровадити їх у масштабне виробництво (Устименко та ін., 2016).

Ще в 1946 році саме в с. Березоточа Лубенського району, на вищезгаданій Станції почалися перші системні дослідження ехінацеї пурпурової, які довели перспективність вирощування і використання

цієї культури. Але тільки через 40 років, після Чорнобильської катастрофи це питання стало нагальним для нашої держави, що згодом призвело до її визнання і широкого медичного застосування (Pospielov & Pospielova, 2022). Сучасний досвід використання ехінацеї довів її імуномодулюючі, протизапальні, ранозагоювальні властивості та безпечність для організму людини. Вивчення фітохімічного складу та сучасні фармакологічні дослідження пояснюють унікальність ехінацеї наявністю комплексу фенольних сполук, полісахаридів, алкіламідів, ефірних олій тощо (Burlou-Nagy et al., 2022; Vlasheva et al., 2024).

Варто відзначити, що професійне і різнобічне вивчення ехінацеї пурпурової (*Echinacea purpurea* (L.) Moench.) і ехінацеї блідої (*Echinacea pallida* (Nutt.) Nutt.) дозволило рекомендувати їх до використання не тільки для виробництва лікарської сировини, а й у тваринництві, кормовиробництві, ветеринарії, харчовій промисловості (Pospielov & Pospielova, 2022), вирощувати для фіторемедіації (Heidari et al., 2018). Тільки на базі Полтавського державного аграрного університету були проведені три міжнародні конференції з вивчення і використання ехінацеї (1998, 2003, 2013 рр.), що є унікальним прикладом цілеспрямованої роботи науковців і практиків України з дослідження одного ботанічного роду *Echinacea* Moench. У результаті була створена сировинна база, що дозволяє забезпечувати сировиною не тільки вітчизняну фармацевтичну промисловість, а й інших країн світу.

Незважаючи на вивчення біологічних і агротехнологічних особливостей ехінацеї (Makukha, 2021), залишаються аспекти, які потребують поглиблених досліджень. Як відомо, ехінацея багаторічна рослина, але за умов її плантаційного вирощування варто її культивувати за дворічним циклом: на перший рік вегетації утворюється розетка, на другий – формуються генеративні пагони. На другий рік під час цвітіння заготовляють надземну масу, восени збирають насіння, викопують кореневища з коренями. Досвід свідчить, що для медичного використання оптимальним є дворічний цикл вирощування; на третій і подальші роки є сенс залишати насінницькі посіви (Pospelov et al., 2020). Нам невідомі дослідження з вивчення ехінацеї як попередника, що пов'язано в першу чергу з обмеженістю виробничих площ та відсутністю досвіду тривалого культивування.

Теоретичні та експериментальні дослідження української школи алелопатологів, які були започатковані академіком А. М. Гродзинським (Юрчак, 2011), дозволили сформулювати та обґрунтувати феномен ґрунтовтоми, який проявляється у зниженні урожайності за комплексної дії біотичних та абіотичних чинників не тільки при повторних та беззмінних посівах польових, багаторічних плодових культур (Стельмах та ін., 2022; Яковенко та ін., 2023), а й лікарських рослин (Tkachova et al., 2022). Відомо, що представники роду *Echinacea* Moench. у коренях та надземній частині містить значну кількість фенольних сполук – до 4–5% від їх маси, які можуть виділятися і потрапляти в ґрунт; після ліквідації плантацій залишаються рослинні рештки, які містять різноманітні речовини (Шевчук та ін., 2011). За таких умов повторні чи багаторічні беззмінні посіви ехінацеї можуть викликати ґрунтовтому та негативну післядію, а саме: зниження продуктивності рослин, активності мікрофлори, біологічної активності ґрунту, накопичення шкідників і хвороб (Щербакова та ін., 2003; Шевчук та ін., 2011).

Практично відсутні відомості про технологічні особливості вирощування ехінацеї блідої (*Echinacea pallida* (Nutt.) Nutt.), яка відрізняється від ехінацеї пурпурової будовою кореневища, високою посухостійкістю, ранніми строками цвітіння (Pospelov et al., 2020). Сировина вирізняється багатим полісахаридним комплексом, наявністю жирної олії в кореневищі та насінні (Ahmadi et al., 2024).

Метою проведених досліджень було вивчення впливу повторного вирощування ехінацеї пурпурової і ехінацеї блідої на біологічну активність ґрунту, продуктивність і морфометричні ознаки рослин другого року вегетації.

Матеріал і методи

Досліди проводились в умовах СК «Радянський» Кременчуцького району Полтавської області в умовах помірно-континентального клімату з нестійким зволоженням. Ґрунти – чорноземи глибоко слабосолонцюваті. В 2019 році була висіяна ехінацея пурпурова та ехінацея бліда з нормою висіву 10 кг/га. В перший рік вегетації агротехнічні заходи включали міжрядне рихлення, ручне прополювання. На другий рік (2020 р.) рано весною проводили боронування посівів до початку вегетації, до стеблування – міжрядне рихлення із вне-

сенням добрив $(NPK)_{30}$. Цвітіння ехінацеї блідої починалося в червні, ехінацеї пурпурової – в липні. Під час повного цвітіння в господарстві збирали надземну масу та висушували на лікарську сировину. В кінці другого року вегетації викопували кореневища з коренями, які також використовували як лікарську сировину. На третій рік (2021 р.) кожну частину поля, де росли види ехінацеї, ділили навпіл та повторно висівали ехінацею, яку вирощували за описаною технологією. Таким чином, територія поля, де ми проводили досліди, мала ділянки, де чотири роки поспіль вирощували кожний вид ехінацеї, та де вони чергувалися (табл. 1). Для досліджень відбирали ґрунт та рослини після чотирьох років вирощування. На ділянках 1 та 3 оцінювали дію повторних посівів, на ділянках 2 та 4 – дію чергування видів ехінацеї. Для порівняння відбирали ґрунт з ділянки, де до цього не вирощували ехінацею.

Зразки ґрунту відбирали тричі за сезон (в травні, липні та жовтні) ґрунтовим буром на глибину 20 см, ґрунт середньої проби висушували до повітряно сухого стану. Біологічну активність ґрунту оцінювали двома методами.

Пряме біотестування ґрунту проводили модифікованим методом Нейбауера-Шнейдера (Щербакова та ін., 2003), коли насіння тест-об'єктів (ячменю) висівалося в чашки Петрі з ґрунтом, і через 14 днів визначали масу надземної частини і кореневої системи. Дослідження проводилися в 4-кратній повторності за всіма варіантами.

Визначення активності фермента каталази визначали за розкладанням пероксиду водню (Стернік та ін., 2015). За допомогою спеціального приладу (газометра) кисень, що виділяється під час реакції, реєстрували через дві хвилини після початку реакції. Кожний зразок ґрунту досліджували в чотирьохразовій повторності.

У 2022 р. рослини ехінацеї пурпурової та ехінацеї блідої під час повного цвітіння зрізали на всіх варіантах досліду (по п'ять типових рослин в кожному варіанті) та визначали кількісні та якісні показники, оцінювали загальну масу рослин та окремих частин і органів. Площу листкової поверхні розраховували методом висічок (Міщенко і Поспєлов, 2023).

Статистичну оцінку отриманих результатів проводили за t-критерієм Стьюдента та визначали найменшу істотну різницю між варіантами дослідів та контролем (Рожков та ін., 2016).

Результати та обговорення

Методи біотестування засновані на вивченні реакції живих організмів на певний фактор, і здійснюються шляхом виконання вегетаційних, лабораторних експериментів і, так званих, біологічних проб (Tkachova et al., 2022). Не дивлячись на те, що цей метод не відтворює природних умов, його потрібно вважати одним із основних, так як дозволяє повністю виключити весь різноманітний побічний вплив, який має місце в польовому досліді, здійснюється швидко і дає можливість з високою достовірністю провести експеримент .

Представлені результати свідчать про певну реакцію біотесту на об'єкт наших досліджень, що відображено в таблиці 2 і рисунку 1. Варто зауважити, що висота проростка ячменю змінювалась у більшому діапазоні порівняно із масою проростка. Це частково свідчить про наявність гормоноподібних речовин у ґрунті, що можуть бути первинного (органо-мінерального) або вторинного (мікробіологічного) походження. Довжина і фітомаса тест-культури, що вирощували на воді (варіант 1) на усіх варіантах були нижчими за варіанти 2–6, де використовували ґрунт. Це дає змогу зробити висновок, що в дослідних зразках ґрунту не містилися інгібітори росту в дієвих концентраціях.

Найбільший приріст проростків ячменю спостерігався при тестуванні зразків ґрунту з ділянки, де ехінацея бліда (2 роки) вирощувалась після ехінацеї пурпуровій (2 роки). При цьому перевищення становило 7,2%

Таблиця 1

Схема досліду з вивчення повторних посівів ехінацеї

Роки	**Ділянка 1**	**Ділянка 2**	**Ділянка 3**	**Ділянка 4**
2019	Е. пурпурова	Е. пурпурова	Е. бліда	Е. бліда
2020	Е. пурпурова	Е. пурпурова	Е. бліда	Е. бліда
2021	Е. пурпурова	Е. бліда	Е. бліда	Е. пурпурова
2022	Е. пурпурова	Е. бліда	Е. бліда	Е. пурпурова

Таблиця 2

Оцінка біологічної активності ґрунту методом прямого біотестування
(тест-культура – ячмінь)

Варіанти досліду, місце, де були взяти ґрунтові зразки	**Довжина проростка, см**		**Маса проростка, г**	
	значення	**+\- до контролю**	**значення**	**+\- до контролю**
1. Контроль – вода	15,6	-	0,104	-
2. Контрольна ділянка	18,2	+2,6	0,123	+0,019
3. Е.бліда після Е.пурпурової	19,5	+3,8*	0,130	+0,026*
4. Е.бліда після Е.блідої	18,5	+2,8*	0,118	+0,014
5. Е.пурпурова після Е.блідої	16,9	+1,3*	0,129	+0,025*
6. Е.пурпурова після Е.пурпурової	16,4	+0,8	0,129	+0,025*
НІР0.05=		1,22		0,022

** Суттєво на 5% рівні порівняно із варіантом 2*

порівняно з варіантом 2. На рівні контрольної ділянки були результати тестування ґрунту, на якому чотири роки росла ехінацея бліда (2 + 2 роки) – 18,5 см проти 18,2 см. Що до варіантів 5 і 6, то висота проростків була достовірно нижчою за контрольний ґрунт на 7,2–9,9%, що свідчить про те, що ґрунт, взятий на ділянках, де вирощувалася ехінацея пурпурова два або чотири роки, гальмував ріст тест культури.

Що стосується маси проростка, то її коливання були від 0,104 г до 0,130 в досліді. Найбільш суттєве пониження відзначалося на варіанті 3, де тестувався ґрунт з ділянки, де ехінацея бліда росла чотири роки – 0,118 г порівняно з 0,123 г (ґрунт з контрольної ділянки). На інших варіантах спостерігалось достовірне збільшення показника на 4,9–5,7%. Проведений дослід дозволяє стверджувати, що ґрунт після повторного вирощування ехінацеї не містить компонентів, активних по відношенню до рослин ячменю ярого.

На рисунку 2 представлені результати вивчення активності каталази в ґрунті при повторному вирощуванні ехінацеї блідої. Отримані дані дозволяють зробити висновок про більш високу каталазну активність ґрунту при вирощуванні ехінацеї порівняно із контролем, що свідчить про позитивну

Рис. 1. Дослідні рослини під час проведення дослідів з прямого біотестування

Позначення: 1 – контроль – вода; 2 – контрольна ділянка; 3 – Е.бліда після Е.пурпурової; 4 – Е.бліда після Е.блідої; 5 – Е.пурпурова після Е.блідої; 6 – Е.пурпурова після Е.пурпурової

дію культури на ґрунт. При цьому найбільшою вона була в липні, перевищуючи контроль на 2,23–2,43 мл. O_2 на 1 г ґрунту/2 хв. Як свідчать дослідження в травні і липні, повторне вирощування ехінацеї блідої не вплинуло на біологічну активність ґрунту, різниця в активності каталази суттєво не відрізнялася. В ґрунті, що відбирався у вересні, активність ферменту була нижче на 1,9 мл. O_2 на 1 г ґрунту/2 хв. при вирощуванні ехінацеї блідої два виробничих цикли поспіль порівняно із чергуванням видів ехінацеї.

Оцінка біологічної активності ґрунту за умов повторного вирощування ехінацеї пурпурової наведена на рисунку 3. Встановлено, що під час відростання ехінацеї (травень) найбільша каталазна активність (4,37 мл.O_2 на 1 г ґрунту/2 хв), це в три рази перевищує контроль, відзначалася на варіанті вирощування ехінацеї пурпурової після ехінацеї пурпурової. На варіанті, ехінацея бліда після ехінацеї пурпурової, біологічна активність ґрунту на 75% перевищувала контроль і становила 2,54 мл. O_2 на 1 г ґрунту/2 хв. Аналогічні закономірності прослідковувалися і наприкінці вегетації. Разом із цим улітку біологічна активність ґрунту на контролі перевищувала дослідні варіанти в 2,1–8,7 рази. При цьому найбільше зниження реєструвалося на варіанті вирощування ехінацеї блідої після ехінацеї пурпурової.

Порівняння динаміки біологічної активності ґрунту (рис. 2 та рис. 3), дозволяє зро-

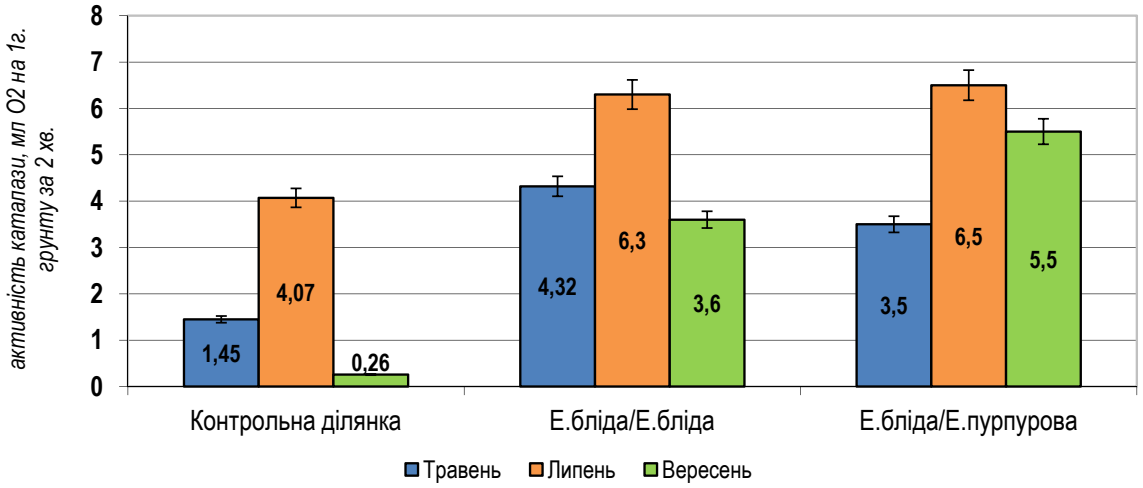


Рис. 2. Біологічна активність ґрунту при вирощуванні ехінацеї блідої
(відбори в травні: $НІР_{0,05}$=1,85; відбори в липні: $НІР_{0,05}$=2,05; відбори в вересні: $НІР_{0,05}$=2,25)

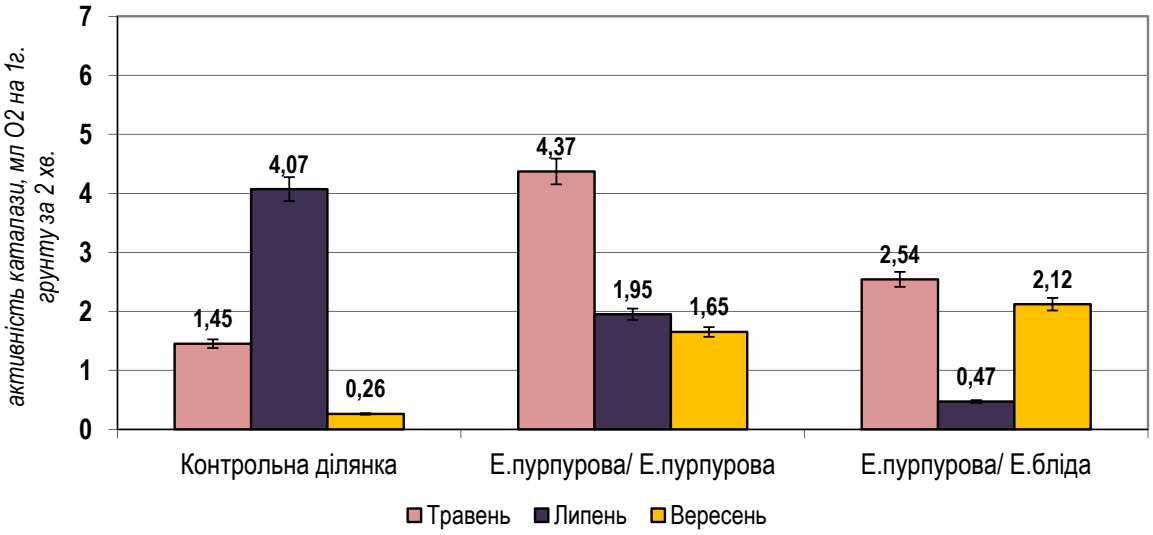


Рис. 3. Біологічна активність ґрунту при вирощуванні ехінацеї пурпурової
(*відбори в травні: $НІР_{0,05}$=1,55; відбори в липні: $НІР_{0,05}$=1,62; відбори в вересні: $НІР_{0,05}$=1,30)*

бити висновок, що при повторному вирощуванні ехінацеї пурпурової більш висока вона була весною, тоді як ехінацеї блідої – влітку та восени. Варто зауважити, що під час всього вегетаційного періоду каталазна активність ґрунту при вирощуванні ехінацеї блідої була вищою порівняно з ехінацеєю пурпуровою.

Отримані дані дозволяють припустити, що при вирощуванні ехінацеї блідої відбувається збагачення ґрунту органічними сполуками, на що вказує більш висока каталазна активність відносно контролю. Понижена каталазна активність ґрунту при вирощуванні ехінацеї пурпурової свідчить на те, що вона може викликати більш активні алелопатичні реакції у ґрунті, особливо по відношенню до культур, які будуть вирощуватися після неї, що співпадає з висновками інших дослідників, які досліджували проблеми алелопатії при вирощуванні ехінацеї (Щербакова та ін., 2003; Шевчук та ін., 2011).

В таблиці 3 наведені результати оцінки морфометричних показників ехінацеї пурпурової залежно від повторного вирощування. Спостерігалася загальна тенденція зменшення показників на варіанті, де вирощували ехінацею пурпурову чотири роки поспіль.

Спосіб вирощування суттєво не вплинув на висоту рослини та масу стебел. Аналіз кількості та розміру стеблових листків у ехінацеї пурпурової свідчить про реакцію на спосіб вирощування культури (таблиця 3). Так, кількість листків на пагонах однієї рослини при повторному вирощуванні ехінацеї становила 97,2 штук, тоді як при чергуванні видів ехінацеї цей показник досягав 116,7 штук, що на 19,5 листків більше. Аналогічні закономірності простежувалися при визначенні маси всіх стеблових листків: при повторному вирощуванні – 72,75 г, а при чергуванні видів ехінацеї – 93,36 г, що на 12,8% більше. Маса рослини на варіанті чергування видів перевищувала повторні посіви на 43,3 г, що підтверджувалося статистично.

Облік площі листків ваговим методом дозволив констатувати, що загальна площа фотосинтетичної поверхні рослин становила 898,5 см^2 та 1192,0 см^2, тобто при чергуванні видів ехінацеї вона була в 1,32 рази більшою, що відбувалося головним чином за рахунок збільшення площі стеблових листків.

Дослідження ехінацеї блідої (таблиця 4) переконують, що цей вид більше реагує на спосіб вирощування порівняно з ехінацеєю пурпуровою. Маса стебел була вищою на варіанті чергування видів ехінацеї (Б): 158,4 г проти 107,1 г, що на 51,3 г більше та підтверджується статистично. Підрахунок стеблових листків ехінацеї блідої свідчить, що при повторному вирощуванні ехінацеї блідої загальна кількість листків на рослині становила 27,2 шт., а при чергуванні культури – 41,4, що достовірно більше на 52,2%.

Таблиця 3

Характеристика розвитку ехінацеї пурпурової в повторних посівах

Показники	**Повторні посіви:**		
	Е. пурпурова після Е. пурпурової (А)	**Е. пурпурова після Е. блідої (Б)**	**+/- Б до А**
Висота рослини, см	*98,5*	*92,5*	*-6,0*
Маса стебел, г	305,2	314,5	+9,3
Маса стеблових листків, г	72,8	93,4	+20,6*
Маса розеткових листків, г	9,8	12,1	+2,3
Маса суцвіть, г	109,8	120,9	+11,9
Маса рослини, г	*497,6*	*540,9*	*+43,3**
Кількість листків на пагонах, шт.	97,2	116,7	+19,5*
Кількість листків в розетці, шт.	12,2	14,2	+2,0
Кількість листків на рослині, шт	99,4	130,9	+31,5*
Кількість суцвіть, шт.	*44,8*	*46,7*	*+1,9*
Площа стеблових листків, см^2	758,2	1015,3	+257,1*
Площа розеткових листків, см^2	140,3	176,7	+36,4
Загальна площа, см^2	898,5	1192,0	*+293,5**

**різниця достовірна на рівні $t_{0,05}$*

Таблиця 4

Характеристика розвитку ехінацеї блідої в повторних посівах

Показники	**Повторні посіви:**		
	Е. бліда після Е. блідої (А)	**Е. бліда після Е. пурпурової (Б)**	**+/- Б до А**
Висота рослини, см	91,6	85,5	*-6,1*
Маса стебел, г	107,1	158,4	51,3*
Маса стеблових листків, г	31,3	51,8	20,5*
Маса розеткових листків, г	14,0	13,7	-0,3
Маса суцвіть, г	9,8	14,4	4,6
Маса рослини, г	*162,2*	*238,3*	*76,3**
Кількість листків на пагоні, шт.	27,2	41,4	14,2*
Кількість листків в розетці, шт.	8,5	9,0	0,5
Кількість листків на рослині, шт	35,7	50,4	14,7*
Кількість суцвіть, шт.	*9,3*	*14,4*	*5,1**
Площа стеблових листків, см^2	285,6	463,7	178,1*
Площа розеткових листків, см^2	225,3	227,7	2,4
Загальна площа,см^2	510,9	691,4	*180,5**

**різниця достовірна на рівні $t_{0,05}$*

Маса всіх листків рослини на варіанті повторного вирощування ехінацеї блідої становила 31,3 г, а на варіанті чергування видів – 51,8. Таким чином, при чергуванні видів ехінацеї маса листків була в 1,65 разів більшою порівняно з іншим варіантом.

Розрахунок площі стеблових листків дозволив встановити, що на варіанті Б вона становила 463,7 см^2, а при повторному вирощуванні – 285,6 см^2, що в 1,62 рази більше. Із наведених результатів можна зробити висновок, що спосіб вирощування не вплинув на розвиток розеткових листків: їх кількість та маса не розрізнялась статистично за варіантами. Розрахунок площі фотосинтетичної поверхні демонструє, що при повторному вирощуванні ехінацеї блідої вона становила 510,9 см^2, а при чергуванні видів – 691,4 см^2. Достовірна різниця між варіантами становила 180,5 см^2 за рахунок більш розвинутих стеблових листків.

Загальна кількість суцвіть при чергуванні видів становила 14,4 шт. проти 9,3 шт. за умов повторного вирощування, що на 54,8% більше. Маса суцвіть також мала тенденцію до збільшення: 14,4 г проти 9,8 г відповідно.

Висновки

Проведені дослідження дозволили встановити вплив повторних посівів на біологічну активність ґрунту та морфометричні показники двох видів ехінацеї: ехінацеї пурпурової та ехінацеї блідої.

За оцінкою прямого біотестування ґрунту, достовірний приріст проростків ячменю спостерігався на ділянках ехінацеї блідої, що росла після ехінацеї пурпурової (на 7,2% до контролю). Повторне вирощування вказаного виду не викликало реакції тест-культури. Гальмування біотесту відзначалося при вирощування ехінацеї пурпурової повторно чи після ехінацеї блідої (на 7,2–9,9%).

Спостерігалася загальна тенденція більш високої активності ферменту каталази в ґрунті при вирощуванні ехінацеї блідої порівняно із ехінацеєю пурпуровою. За цих умов у посівах ехінацеї пурпурової біологічна активність ґрунту була більш високою весною (в 1,75–3,01 рази), а ехінацеї блідої – влітку та восени (в 1,54–1,60 рази та 13,85–21,15 рази відповідно) у порівнянні з контролем.

Порівняння продуктивності ехінацеї залежно від способу вирощування показало достовірне зниження основних кількісних і якісних показників при повторному вирощуванні. У ехінацеї пурпурової зниження маси стеблових листків становило 22,0%, маса рослини – 8,0%, кількість листків на рослині – 24,1%, площа фотосинтетичної поверхні – 24,6%; у ехінацеї блідої – маса стебел на 32,4%, маса рослини – на 31,9%, кількість листків на рослині – на 29,2%, площа листків на рослині – на 26,1%.

Перспективи подальших досліджень

Встановлений факт зниження продуктивності ехінацеї при її повторному вирощуванні та зміни біологічної активності ґрунту при цьому розкриває наукову та технологічну проблему, яку варто в подальшому вивчати та враховувати при плантаційному

вирощуванні видів ехінацеї. В першу чергу не можна допускати тривалого вирощування ехінацеї на одному місці, особливо насінницьких посівів. Негативну післядію повторного вирощування рекомендуємо знижувати застосуванням бінарних посівів, сидеральних культур/парів, бобових трав, внесенням органічних добрив тощо.

Список використаної літератури

Вожегова Р.А., Лиховид П.В., Біляєва І.М. Сучасний стан, перспективи та напрями розвитку виробництва лікарських рослин в Україні. *Таврійський науковий вісник.* 2021. № 118. С. 57–66. https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.118.7

Міщенко О.В., Поспєлов С.В. Продуктивність ехінацеї блідої (Echinacea pallida (Nutt.) Nutt.) першого року вегетації залежно від способу вирощування розсади *Таврійський науковий вісник.* 2023. № 132. С. 125–131. https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.132.16.

Рожков А.О. Дослідна справа в агрономії : навч. посіб. у 2 кн. та ін. Харків : Майдан, 2016. Кн. 1: Теоретичні аспекти дослідної справи. 316 с.

Стельмах Д., Клеєвська В., Кручина В. Вплив на навколишнє середовище поширення монокультур в аграрному секторі. *Actual scientific research in the modern world.* 2022. Вип. 12 (92). P. 17–20.

Стернік В., Марциновський В., Мельник В. Вміст ферменту каталази в ґрунті на території АЗС м. Рівного. *Науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки.* 2015. № 2. С. 113–118.

Устименко О.В., Глущенко Л.А., Куценко Н.І. Значення наукової діяльності Станції лікарських рослин у формуванні, становленні та розвитку лікарського рослинництва. *Агроекологічний журнал.* 2016. № 2. С. 29–38.

Шевчук О.М., Агурова І.В., Кохан Т.П. Алелопатична активність грунту в ризосфері Echinacea purpurea (L.) Moench та Silybum marianum (L.) Gaertn. *Інтродукція рослин.* 2011. № 4. С. 67–71.

Щербакова Т.О., Головко Е.А., Поспєлов С.В., Самородов В.М., Міщенко О.В. Біологічна активність і біохімічний аналіз ризосферного ґрунту різних видів роду ехінацея (Echinacea Moench). *Вісник Полтавської державної академії.* 2003. № 5. С. 96–99.

Юрчак Е. Витоки та особливості становлення вчення про алелопатію у першій половині XX ст. *Історія наук і біографістика.* 2023. № 3. С. 208–229.

Яковенко Р.В., Дем'янюк О.С., Синенко Д.І., Чепурний В.Г., Лисанюк В.Г. Проблема ґрунтовтоми в монокультурі яблуні. *Збалансоване землекористування.* 2023. № 3. С. 121–128. https://doi.org/10.33730/2310-4678.3.2023.287826.

Ahmadi F., Kariman K., Mousavi M., Rengel Z. Echinacea: Bioactive Compounds and Agronomy. *Plants.* 2024. Vol. 13. № 1235. https://doi.org/10.3390/plants13091235.

Burlou-Nagy C., B˘anic˘a, F., Jurca, T., Vicas L.G., Marian E., Muresan M.E., Bácskay I., Kiss R., Fehér P., Pallag A. Echinacea purpurea (L.) Moench: Biological and Pharmacological Properties. A Review. *Plants.* 2022. Vol. 11. № 1244. https://doi.org/10.3390/plants11091244.

Heidari S., Fotouhi Ghazvini R., Zavareh M., Kafi M. Physiological responses and phytoremediation ability of Eastern Coneflower (Echinacea purpurea) for crude oil contaminated soil. *Caspian Journal of Environmental Sciences.* 2018. Vol. 16 (2). P. 149–164. https://doi.org/10.22124/CJES.2018.2957.

Makukha O. Technological Improvement of Echinacea purpurea Cultivation. *Ecological Engineering & Environmental Technology.* 2021. Vol. 22 (5). P. 89–96. https://doi.org/10.12912/27197050/139336.

Saletovic M., Cipurkovic A., Horozic E., Dozic A., Selimbasic V. Distribution of Some Elements in the Soil Where Echinacea is Cultivated. *European Journal of Scientific Research.* 2017. Vol. 146 (2). P. 194–202.

Shahrajabian M.H., Sun W. Five Important Seeds in Traditional Medicine, and Pharmacological Benefits. *Seeds.* 2023. Vol. 2. P. 290–308. https://doi.org/10.20944/preprints202307.1724.v1.

Pospelov S., Zdor V., Mishchenko O., Pospelova A., Kovalenko N. Model of creation of productive agrocenosis of Echinacea. *E3S Web of Conferences.* 2020. Vol. 222. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022202048.

Pospielov S.V., Pospielova G.D. Promising Direction of use Echinacea Moench in Ukraine. *Grail of Science.* 2022. № 16. P. 157–159. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.17.06.2022.026.

Tkachova Ye., Fedorchuk M., Kovalenko O. Allelopathic activity of plants Hyssopus officinalis L. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science.* 2022. Vol. 26 (4). P. 19–29. https://doi.org/10.56407/2313-092X/2022-26(4)-2.

Vlasheva M., Katsarova M., Dobreva A., Dzhurmanski A., Denev P., Dimitrova S. Echinacea Species Cultivated in Bulgaria as a Source of Chicoric and Caftaric Acids. *Agronomy*. 2024. Vol. 14. № 2081. https:// doi.org/10.3390/agronomy14092081.

References

Vozheghova, R.A., Lykhovyd, P.V., & Biljajeva, I.M. (2021). Suchasnyj stan, perspektyvy ta naprjamy rozvytku vyrobnyctva likarsjkykh roslyn v Ukrajini [Current state, prospects and directions of the development of medicinal plant growing in Ukraine]. *Tavriys'kyy naukovyy visnyk [Taurida Scientific Herald],* 118, 57–66. https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.118.7 [in Ukrainian].

Mishhenko, O.V., & Pospjelov, S.V. (2023). Produktyvnistj ekhinaceji blidoji (Echinacea pallida (Nutt.) Nutt.) pershogho roku veghetaciji zalezhno vid sposobu vyroshhuvannja rozsady [Productivity of the first year of vegetation pale purple coneflower (Echinacea palida (Nutt.) Nutt.) depending on seedling cultivation method]. *Tavriys'kyy naukovyy visnyk [Taurida Scientific Herald]*, 132, 125–131. https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.132.16 [in Ukrainian].

Rozhkov, A.O., Puzik, V.K., Kalensjka, S.M., Puzik, L.M., Popov, S.I., Muzafarov, N.M., Bukhalo, V.Ja., & Kryshtop, Je.A. (2016). Doslidna sprava v aghronomiji [Research work in agronomy] (Ch. 1: Teoretychni aspekty doslidnoji spravy [Theoretical aspects of research work]). Kharkiv : Majdan [in Ukrainian].

Steljmakh, D., Klejevsjka, V., & Kruchyna, V. (2022). Vplyv na navkolyshnje seredovyshhe poshyrennja monokuljtur v aghrarnomu sektori [Environmental impact of the spread of monocultures in the agricultural sector]. *Actual scientific research in the modern world,* 12 (92), 17–20 [in Ukrainian].

Sternik, V., Marcynovsjkyj, V., & Meljnyk, V. (2015). Vmist fermentu katalazy v grunti na terytoriji AZS m. Rivnogho [The Content of the Enzyme Catalase in the Soil on the Territory of the Gas Station Rivne]. *Naukovyy visnyk Skhidnoyevropeys'koho natsional'noho universytetu imeni Lesi Ukrayinky [Lesya Ukrainka Eastern European National University Scientific Bulletin],* 2, 113–118 [in Ukrainian].

Ustymenko, O.V., Ghlushhenko, L.A., & Kucenko, N.I. (2016). Znachennja naukovoji dijaljnosti Stanciji likarsjkykh roslyn u formuvanni, stanovlenni ta rozvytku likarsjkogho roslynnyctva [The significance of the scientific activities of the medicinal plant research station in the formation, formation and development of medicinal plant growing]. *Ahroekolohichnyy zhurnal* [*Agroecological Journal]*, 2, 29–38 [in Ukrainian].

Shevchuk, O.M., Aghurova, I.V., & Kokhan, T.P. Alelopatychna aktyvnistj ghruntu v ryzosferi Echinacea purpurea (L.) Moench ta Silybum marianum (L.) Gaertn [Allelopatic activity of soil in the Echinacea purpurea (L.) Moench and Silybum marianum (L.) Gaertn. rizosphere]. *Introduktsiya roslyn* [*Plant introduction]*, 4, 67–71 [in Ukrainian].

Shherbakova, T.O., Gholovko, E.A., Pospjelov, S.V., Samorodov, V.M., & Mishhenko, O.V. (2003). Biologhichna aktyvnistj i biokhimichnyj analiz ryzosfernogho gruntu riznykh vydiv rodu ekhinaceja (Echinacea Moench) [Biological activity and biochemical analysis of rhizosphere soil of different species of the genus Echinacea (Echinacea Moench)]. *Visnyk Poltavs'koyi derzhavnoyi akademiyi [Bulletin of Poltava State Agrarian Academy],* 5, 96–99 [in Ukrainian].

Jurchak, E. (2023). Vytoky ta osoblyvosti stanovlennja vchennja pro alelopatiju u pershij polovyni XX st [Origins and features of the formation of the doctrine about allelopathy in the first half of the XX century]. *Istoriya nauk i biohrafistyka [History of sciences and biography],* 3, 208–229 [in Ukrainian].

Jakovenko, R.V., Dem'janjuk, O.S., Synenko, D.I., Chepurnyj, V.Gh., & Lysanjuk, V.Gh. (2023). Problema gruntovtomy v monokuljturi jabluni [The Problem of Soil fatigue in Apple orchardsMonoculture]. *Zbalansovane zemlekorystuvannya [Balanced natue using],* 3, 121–128. https://doi.org/10.33730/2310-4678.3.2023.287826 [in Ukrainian].

Ahmadi, F., Kariman, K., Mousavi, M., & Rengel, Z. (2024). Echinacea: Bioactive Compounds and Agronomy. *Plants,* 13, 1235. https://doi.org/10.3390/plants13091235 [in English].

Burlou-Nagy, C., B˘anic˘a, F., Jurca, T., Vicas, L.G., Marian, E., Muresan, M.E., Bácskay, I., Kiss, R., Fehér, P., & Pallag, A. (2022). Echinacea purpurea (L.) Moench: Biological and Pharmacological Properties. A Review. *Plants*, 11, 1244. https://doi.org/10.3390/plants11091244 [in English].

Heidari, S., Fotouhi, Ghazvini R., Zavareh, M., & Kafi, M. (2018). Physiological responses and phytoremediation ability of Eastern Coneflower (Echinacea purpurea) for crude oil contaminated soil. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 16 (2), 149–164. https://doi.org/10.22124/CJES.2018.2957 [in English].

Makukha, O. (2021). Technological Improvement of Echinacea purpurea Cultivation. *Ecological Engineering&EnvironmentalTechnology,*22(5),89–96.https://doi.org/10.12912/27197050/139336 [in English].

Saletovic, M., Cipurkovic, A., Horozic, E., Dozic, A., & Selimbasic, V. (2017). Distribution of Some Elements in the Soil Where Echinacea is Cultivated. *European Journal of Scientific Research*, 146 (2), 194–202 [in English].

Shahrajabian, M. H., & Sun, W. (2023). Five Important Seeds in Traditional Medicine, and Pharmacological Benefits. *Seeds*, 2, 290–308. https://doi.org/10.20944/preprints202307.1724.v1 [in English].

Pospelov, S., Zdor, V., Mishchenko, O., Pospelova, A., & Kovalenko, N. (2020). Model of creation of productive agrocenosis of Echinacea. *E3S Web of Conferences,* 222, 1–9. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022202048 [in English].

Pospielov, S.V., & Pospielova, G.D. (2022). Promising Direction of use Echinacea Moench in Ukraine. *Grail of Science*, 16, 157–159. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.17.06.2022.026 [in English].

Tkachova, Ye., Fedorchuk, M., & Kovalenko, O. (2022). Allelopathic activity of plants Hyssopus officinalis L. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*, 26 (4), 19–29. https://doi.org/10.56407/2313-092X/2022-26(4)-2 [in English].

Vlasheva, M., Katsarova, M.; Dobreva, A., Dzhurmanski, A., Denev, P., & Dimitrova, S. (2024). Echinacea Species Cultivated in Bulgaria as a Source of Chicoric and Caftaric Acids. *Agronomy*, 14, 2081. https://doi.org/10.3390/agronomy14092081 [in English].

Отримано: 04.11.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

УДК 581.146:635.21:631.531
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.14

МІКРОКЛОНАЛЬНЕ РОЗМНОЖЕННЯ В КУЛЬТУРІ *IN VITRO*: МОЖЛИВОСТІ ТА ПЕРЕВАГИ ВИКОРИСТАННЯ

А. М. Рибальченко[1], Л. М. Криворучко[2]

Метод мікроклонального розмноження є важливим біотехнологічним напрямом, який надає можливість здійснювати масове розмноження рослин в умовах in vitro. Цей метод відрізняється від звичайного насіннєвого або вегетативного розмноження рослин. Вирощування рослин в культурі in vitro забезпечує розмноження рослин, що дозволяє отримувати генетично однорідний і безвірусний посадковий матеріал. Він є ефективним для прискореного розмноження в значних обсягах особливо цінних генотипів, видів та сортів рослин, що є зникаючими, а також для розмноження рослин, відтворення яких в природних умовах насіннєвим і вегетативним шляхом є досить ускладнено.

Використання методу мікроклонального розмноження у певних видів застосовують для прискореного розмноження на комерційній основі садивного матеріалу, оздоровленого від патогенів (вірусних, бактеріальних, грибних).

У статті проаналізовано особливості мікроклонального розмноження рослин в умовах культури in vitro, вплив модифікації живильних середовищ для отримання рослин-регенерантів, які будуть придатними для використання в умовах in vivo. Виділено загальні етапи, що відбуваються під час мікроклонального розмноження рослин. Встановлено, що на процес мікроклонального розмноження рослин впливають генетичні, фізіологічні, гормональні, фізичні фактори. Встановлено, що мікроклональне розмноження рослин має переваги такі як, збереження генетичного різноманіття, одержання генетично однорідного матеріалу, незалежність від сезону та погодно-кліматичних умов та можливість проводити розмноження протягом року, залучення мінімальної кількості вихідного матеріалу, виробництво садивного матеріалу для культур, що мають низькі коефіцієнти розмноження, отримання безвірусного садивного матеріалу.

Ключові слова: *мікроклональне розмноження, експлант, поживне середовище, фітогормони, садивний матеріал.*

[1] кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри селекції, насінництва і генетики
(Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава)
e-mail: anna.rybalchenko@pdau.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2308-7853
[2] кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри селекції, насінництва і генетики
(Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава)
e-mail: lyudmyla.kryvoruchko@pdau.edu.ua
ORCID: 0000-0002-8263-0481

MICROCLONAL REPRODUCTION IN *IN VITRO* CULTURE: POSSIBILITIES AND ADVANTAGES OF USE

A. M. Rybalchenko, L. M. Kryvoruchko

The microclonal propagation method is an important biotechnological trend that makes it possible to carry out mass reproduction of plants in vitro. This method differs from conventional seed or vegetative propagation of plants. Growing plants in in vitroculture ensures plant propagation, which allows for the production of genetically homogeneous and virus-free planting material. It is effective for the accelerated reproduction of particularly valuable genotypes, species and varieties of endangered plants, as well as for the reproduction of plants that are difficult to reproduce in natural conditions by seed and vegetative means.
In certain species, the microclonal propagation method is used to accelerate the commercial propagation of planting material that has been treated for pathogens (viral, bacterial, fungal).
The article analyzes the peculiarities of microclonal propagation of plants in in vitro culture, the influence of modification of culture media to obtain regenerated plants suitable for use in vivo. The general stages that occur during microclonal propagation of plants are highlighted. It has been established that the process of microclonal propagation of plants is influenced by genetic, physiological, hormonal, and physical factors.
It has been established that microclonal plant propagation has the following advantages: preservation of genetic diversity, obtaining genetically homogeneous material, independence from season and weather and climatic conditions and the ability to reproduce throughout the year, involvement of a minimum amount of source material, production of planting material for crops with low reproduction rates, and obtaining virus-free planting material.

Key words: *microclonal propagation, explant, culture medium, phytohormones, planting material.*

Вступ

Альтернативою звичним традиційним методам розмноження рослин є використання новітніх біотехнологій, серед яких провідна роль належить мікроклональному розмноженню. Біотехнологічні підходи використовуються для збереження, сприяння розмноженню та тиражуванню унікальних і цінних сільськогосподарських культур (Олійник та ін., 2016).

Здатність рослинної клітини реалізовувати притаманну їй тотипотентність лежить в основі методу мікроклонального розмноження, який базується на використанні головних аспектів диференціації, розвитку клітин, культивуванні тканин, органів рослинного матеріалу на штучно створених живильних середовищах в контрольованих асептичних умовах.

Методику розмноження рослин в культуральних умовах було розроблено французьким дослідником Ж. Морелем. Він проводив свої дослідження на орідеях та отримав перші рослини-регенеранти (Кунах, 2005).

Мікроклональне розмноження – це інноваційний біотехнологічний метод, який набуває все більшої популярності в сільському господарстві та передбачає розмноження рослин за допомогою окремих клітин, тканин або органів у стерильних умовах *in vitro*. Цей метод відрізняється від звичайного насіннєвого або вегетативного розмноження рослин. Вирощування рослин *in vitro* – сучасний метод розмноження рослин, що дозволяє отримувати генетично однорідний і безвірусний посадковий матеріал (Мельничук та ін., 2003).

Великі обсяги неконтрольованої торгівлі садивним матеріалом сприяють розширенню видового складу збудників хвороб і шкідників. Це також спричинює поширення вірусних захворювань, що може становити загрозу в майбутньому. Одним із варіантів рішення проблеми оздоровлення садивного матеріалу від патогенів рослин є методи мікроклонального розмноження *in vitro* (Лавриненко та ін., 2016).

Метою дослідження було визначити основні етапи процесу мікроклонального розмноження та фактори, що впливають на його перебіг, а також узагальнити основні переваги мікроклонального розмноження на основі аналізу літературних джерел.

Матеріал і методи

Для реалізації мети дослідження використовувалася вітчизняна та іноземна література провідних науковців у галузі біотехнології рослин, зокрема, мікроклонального розмноження рослин.

Результати та обговорення

Мікроклональне розмноження проводиться в стерильних умовах, що зни-

жує ризик поширення хвороб та шкідників з материнських рослин на потомство. Завдяки цьому методу, рослини-потомки можуть рости здоровими та міцними, що сприяє збільшенню продуктивності та зниженню витрат на захист рослин від шкідників і хвороб (Lohar, 2019).

Мікроклональне розмноження гарантує високий рівень генетичної однорідності потомства, що дозволяє підтримувати і поширювати бажані характеристики сорту, зокрема, такі як стійкість до хвороб, висока продуктивність та якість. Метод дозволяє отримувати значну кількість рослин-потомків від одного рослинного матеріалу за короткий проміжок часу. Цей метод розмноження не залежить від сезону, а тому може здійснюватися протягом усього року, що дозволяє забезпечити стабільне постачання рослинного матеріалу (Войтовська та ін., 2023).

В Україні на теперішній час метод мікроклонального розмноження досить активно застосовують у галузі картоплярства, де він базується на індукованому регуляторами росту (цитокінінами) розростанні верхівкових, а також пазушних меристем, котрі дають початок великій кількості пагонів. Згодом їх мікроживцюють та субкультивують на свіжі поживні середовища, даний процес декілька разів повторюють. Таким чином, лише з однієї бруньки можливо отримати сотні тисяч рослин за рік (Лавриненко та ін., 2017).

Мікроклональне розмноження надає можливість отримувати значну кількість рослин з мінімальними витратами насіння, добрив, води. Скорочення витрат на засоби захисту рослин також є важливим фактором економії ресурсів (рис. 1).

Використання методу клонального мікророзмноження *in vitro* надає можливість збільшити коефіцієнти розмноження, а також пришвидшити селекційний процес внаслідок розмноження цінних генотипів. Клональне мікророзмноження є ефективним способом оздоровлення садивного матеріалу від вірусної інфекції, шкодочинність якої може досягати 50%. Метод мікроклонального розмноження зумовлює активацію розвитку існуючих меристем у рослині та усуненні явища апікального домінування (Івченко та ін., 2018).

Метод мікроклонального розмноження досить поширений для швидкого розмноження та виробництва ягідних (суниці, малини, ожини, лохини) та плодових культур (алича, слива, персик) (Подгаєцький та ін., 2018).

При культивування ізольованих рослинних експлантів потрібно дотримуватися технологічних прийомів, які за послідовністю виконання, поділяють на чотири етапи:

I етап – Відбір експланта, введення його в культуру *in vitro* й ініціація розвитку. На цьому етапі здійснюють вибір рослин культиварів, найбільш вдалі типи первинних експлантів, визначають режим їх стерилізації.

II етап – Власне мікророзмноження. Цей етап передбачає підбір оптимального живильного середовища для росту та розвитку експлантів в культурі *in vitro.*

Рис. 1. Переваги мікроклонального розмноження рослин

Активація розвитку меристем з відібраних експлантів.

III етап – Укорінення рослин.

IV етап – Адаптація біоматеріалу до умов *in vivo*. Перенесення рослин із стерильних умов *in vitro* в природні умови для подальшого вирощування.

Виділяють ряд факторів, що впливають на процес мікроклонального розмноження рослин.

Генетичні фактори. Одним з найбільш суттєвих факторів є добір материнської рослини з врахуванням її сортових та видових особливостей, а також тип експланту. На ефективність використання матеріалу, що розмножили, впливає правильність відбору вихідного матеріалу для наступної ізоляції експлантів.

Важливо, щоб відібрані рослини для культивування були не вражені хворобами (вірусними, бактеріальними, грибними), а також знаходилися в стані активного росту (Dixcon, 1985). Цибулини, бульби, кореневища, котрі знаходяться в стані спокою, не придатні до культивування, попередньо їх доцільно обробити високими або низькими температурами перед введенням в культуру для переходу від фази спокою до фази інтенсивного росту. Відбір експланта доцільно здійснювати, орієнтуючись не лише на показники діагностики наявності інфекції, а варто враховувати також генотип вихідного матеріалу (Hasegawa, 1980).

Придатність до розмноження обумовлена генетично. Суниці розмножуються досить великою кількістю способів (укоріненими розетками, що формуються на вусиках, поділом куща, насінням, меристемою в культурі тканин), а, наприклад, обліпиха – жодним, в природних умовах – черенкується. Варто відзначити, що дводольні культури мають більшу регенераційну придатність, у порівнянні з однодольними (Субін, 2015; Mohamed, 2007).

Значна регенераційна здатність властива для видів рослин з родин Solanaceae, Asteraceae, Umbeliferae, Cruciferae, а низька – для видів рослин з родин Poaceae, Fabaceae.

Фізіологічн фактори. При доборі експланту враховують його походження, вік та будову. Важливо забезпечити найбільшу стабільність матеріалу, який буде клонуватися, щоб запобігти утворення аномальних рослин доцільно використовувати молоді, не сильно диференційовані тканини в якості експланта. Такі експланти краще укорінюються (Стадник та ін., 2015).

Найбільш вдало для культивування використовувати експланти, що містять меристеми, зокрема, пазушні бруньки, молоді листки, черенки, суцвіття, квітки. Досконалим варіантом для отримання великої кількості пагонів є апікальні та пазушні бруньки здорових рослин, які інтенсивно ростуть. Вони мають здатність досить активно пристосовуватися до умов ізольованої культури, володіють високою інтенсивністю росту, тотипотентністю (Рудишин, 1998).

Розмір експланту також впливає на регенераційну здатність і сильно залежить від рослини-донора. В середньому його розмір варіює в межах від 0,1 мм до 2,0 см. Крупні за розміром експланти мають вищий відсоток виживання, інтенсивно ростуть в культурі *in vitro*, але існує ймовірність виникнення вірусів в клітинах крупних експлантів.

Для стерилізації рослинного матеріалу використовують на вибір: гідрохлорид натрію (NaClO), гідрохлорид кальцію ($Ca(ClO)_2$), хлорамін, етиловий спирт (C_2H_5OH), бром (Br), фенол (C_6H_5OH) (Лісовий, 2017).

Гормональні фактори. Склад поживного середовища варто підбирати спеціально для кожного виду рослин. Одним з визначальних факторів, що впливає на ефективність процесу мікроклонального розмноження рослин є склад живильного середовища, зокрема, вміст у ньому гормонів, вітамінів, вуглеводів, мікро- та макроелементів. Для активації розвитку апікальної меристеми потрібно забезпечити сприятливий фізико-хімічний баланс умов, необхідний для роботи з конкретним біовидом (Мацкевич та ін., 2022).

Досить поширеними при мікророзмноженні в умовах *in vitro* Мурасіге і Скуга, Лінсмейєра і Скуга, Шенка і Хільдебрандта, Ніча, Гамборга, Хеллера. Найбільш часто використовують різні модифікації поживного середовища Мурасіге-Скуга, до складу якого входить неорганічний азот, що позитивно впливає на органогенез та соматичний ембріогенез, хоча певні види рослин мають індивідуальні потреби у елементах живлення. Зазвичай, як джерело вуглеводного живлення використовують сахарозу, рідше фруктозу та глюкозу. Тип культури визначає ступінь концентрації вуглеводів у живильному середовищі на етапах мікроклонального розмноження (Кушнір і Сарнацька, 2005).

Потрібно створити правильний баланс в поживному середовищі регуляторів росту з урахуванням біоматеріалу (Андрієвський та ін., 2019). Для введення меристем в культуру *in vitro* живильні середовища забезпечують підвищеними на 15% концентраціями регуляторів росту, у порівнянні, з базовими середовищами, котрі використовують для розмноження. Такий захід активує початкові етапи росту рослинного матеріалу в ізольованій культурі. Культури здатні до розвитку як на агаризованих, так і на рідких поживних середовищах (Денчиля-Сакаль та ін., 2010).

Максимальний вміст у складі живильних середовищ ауксинів необхідний під час індукції ризогенезу у рослин-регенерантів. Переважання у живильних середовищах ауксинів у співвідношенні до цитокінінів забезпечує явище апікального домінування. Найбільш поширеним ауксином в природі є індолілоцтова кислота (ІОК), а завдяки низці перетворень амінокислоти триптофану відбувається синтез ендогенної ІОК (Мацкевич та ін., 2022).

Фізичні фактори. Температура та освітлення у культуральних кімнатах важливі фізичні фактори, що вливають на культивування. Температура культивування, зазвичай, варіює в межах від 22 до 26°С вдень та від 18 до 22°С вночі. Досить висока інтенсивність світла здатна спричинити хлорози, а також затримку розвитку, але при переносі в ґрунт ці рослини ростуть енергійніше. Важливим є поєднання спектру світла та гормональних факторів живильного середовища для підвищення коефіцієнту розмноження. Відносна вологість повітря 70–80%.

При розмноженні рослинного матеріалу виділяють два типи клонування: вертикальне та горизонтальне. Вертикальний тип клонування притаманний для таких культур, як картопля, спаржа. Для стимулювання розвитку апікальної меристеми до живильного середовища додають високі концентрації ауксинів. З однієї рослини даним методом клонування можна отримати до 7–10 клонів. Горизонтальний тип клонування є більш характерним для буряку цукрового, суниці, цикорію. Для забезпечення їх розвитку та розмноження необхідно додавати до живильного середовища високі концентрації цитокінінів (кінетин, 6-бензиламінопурин). Цитокініни здатні пригнічувати апікальне домінування. При горизонтальному клонуванні з однієї рослини можливо отримати 15–35 клонів (Кушнір, 2001).

Отримавши необхідну кількість клонів, їх потрібно перенести на живильне середовище для укорінення, а також отримання повноцінних рослин. Ауксини є головними індукторами коренеутворення. Після висадки рослин на живильні середовища для ризогенезу через 15–25 діб формується розвинена коренева система і рослинний матеріал є придатним для процесу адаптації і подальшого перенесення в природні умови вирощування.

Важливим етапом мікроклонального розмноження є перенесення рослин з умов *in vitro* до відкритого ґрунту. Оскільки, значна кількість рослин на цьому етапі може загинути обов'язково має цьому етапу передувати адаптація. Етап адаптації дозволяє зробити технологію мікроклонального розмноження економічно вигідною та скоротити витрати виробництва. Адаптація може відбуватися в умовах біотехнологічної лабораторії або ж за використання фітотронів (теплиць).

Отже, для різних генотипів рослин, варто використовувати методику, що передбачає підбір рослини-донора за віком, фенологічну фазу розвитку, тип експлантата, раціональний підбір умов стерилізації, складових компонентів живильного середовища на кожному етапі мікроклонального розмноження.

Вагомий внесок метод мікроклонального розмноження здійснює у виробництво садивного матеріалу дворічних, багаторічних культур з незначною насіннєвою продуктивністю, наприклад, моркви та люцерни. Ефективний мікроклонального розмноження і для триплоїдів, що не здатні розмножуватися самостійно, наприклад, цукровий буряк. У галузі квітникарства, наприклад, метод ефективний для виробництва садивного матеріалу троянд, тюльпанів, орхідей, бегонії, узамбарської фіалки (Сатарова та ін., 2016).

В умовах сьогодення для культивування рослинних експлантів існують розроблені технологічні прийоми, що виконують на кожному з етапів мікроклонального розмноження. Для таких культур як картопля, ожина, малина, слива, алича та багатьох інших розроблені протоколи біотехнологій мікроклонального розмноження (Мацкевич та ін., 2019). Протоколи біотехнологій мікроклонального розмноження рослин на практиці дозволяють підприємцям-виробникам скоротити витрати коштів і часу на їх дослідження.

Висновки

Метод мікроклонального розмноження рослин є досить ефективним і надає мож-

ливість в значних обсягах підвищити використання цінних генотипів рослин, а також сприяє збереженню та розмноженню різноманітних видів рослин. Особлива цінність методу мікроклонального розмноження полягає в тому, що він дає можливість отримати безвірусний садивний матеріал. За результатами опрацювання літературних джерел виділено основні етапи мікроклонального розмноження, а також фактори, що впливають на процеси його перебігу. Встановлені основні переваги методу мікроклонального розмноження рослин:

– залучення мінімальної кількості вихідного матеріалу;
– одержання генетично однорідного матеріалу;
– збереження генетичного різноманіття;
– виробництво садивного матеріалу для культур, що мають низькі коефіцієнти розмноження;
– отримання безвірусного садивного матеріалу;
– незалежність від сезону та погодно-кліматичних умов та можливість проводити розмноження протягом року.

Список використаної літератури

Андрієвський В.В., Врублевський А.Т., Філіпова Л.М., Мацкевич В.В., Мацкевич О.В. Проблеми мікроклонального розмноження фундука. *Агробіологія.* 2019. № 1. С. 74–84. https://doi.org/10.33245/2310-9270-2019-146-1-74-84.

Войтовська В.І., Заболотна А.В., Кецкало В.В., Ковтунюк З.І. Клональне мікророзмноження індау посівного. *Новітні агротехнології.* 2023. Т. 11. № 1. https://doi.org/10.47414/na.11.1.2023.277429.

Денчиля-Сакаль Г.М., Ніколайчук В.І., Терек В.О. Мікроклональне розмноження рослин *Trifolium pretense L. Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Біологія».* 2010. Вип. 28. С. 1–4.

Івченко Т.В., Мозговська Г.В., Віценя Т.І., Баштан Н.О., Мірошниченко Т.М. Методичні підходи щодо селекції та сучасних технологій розмноження і вирощування батату (*Іротоеа batatas L.)* (методичні рекомендації). Селекційне : ІОБ НААН, 2018. 36 с.

Кунах В.А. Біотехнологія лікарських рослин. Генетичні та фізіолого-біохімічні основи. Київ. 2005. 730 с.

Кушнір Г.П., Сарнацька В.В. Мікроклональне розмноження рослин. Теорія і практика. К. : Наукова думка, 2005. 270 с.

Кушнір Г.П. Стан і перспективи клонального мікророзмноження рослин в Україні. *Генетика і селекція в Україні на межі тисячоліть.* 2001. Т. 1. С. 484–500.

Лавриненко Ю.О., Балашова Г.С., Базалій В.В. Формування мікробульб картоплі в культурі *in vitro* залежно від температури та інтенсивності освітленості. *Фактори експериментальної еволюції організмів.* 2017. Т. 21. С. 57–61.

Лавриненко Ю.О., Балашова Г.С., Котова О.І. Культивування рослин картоплі *in vitro* за мікроклонального розмноження. *Вісник аграрної науки.* 2016. № 11. С. 43–47.

Лісовий М.М. Особливості отримання асептичної культури *Thuja Occidentalis L.* в умовах *in vitro. Науковий вісник НЛТУ України.* 2017. Вип. 27 (9). С. 27–29. https://doi.org/10.15421/40270905.

Мацкевич В.В., Подгаєцький А.А., Філіпова Л.М. Мікроклональне розмноження окремих видів рослин (протоколи технологій): науково-практичний посібник. Біла Церква, БНАУ. 2019. 85 с.

Мацкевич В.В., Філіпова Л.М., Олешко О.Г. Фізіологія та біотехнологія рослин: підручник. Біла Церква : БНАУ, 2022. 427 с.

Мацкевич О.В., Кімейчук І.В., Мацкевич В.В., Павліченко А.А. Трофічні та фітогормональні детермінанти онтогенезу *in vitro. Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Агрономія і біологія».* 2022. Вип. 2 (48). С. 111–123. https://doi.org/10.32845/agrobio.2022.2.16

Мельничук М.Д., Новак Т.В., Кунах В.А. Біотехнологія рослин. Підручник. Киев: Поліграфконсалтинг, 2003. 520 с.

Олійник О.О., Клюваденко А.А., Мельничук М.Д. Покращення складу середовищ для підвищення росту і розвитку троянди ефіроолійної в культурі *in vitro. Науковий вісник НЛТУ України.* 2016. Вип. 26. 7. С. 134–139.

Подгаєцький А.А., Мацкевич В.В., Подгаєцький А.Ан. Особливості мікроклонального розмноження видів рослин: монографія. Біла Церква : БНАУ, 2018. 208 с.

Рудишин С.Д. Основи біотехнології рослин: навчальний посібник. Вінниця : МП «ЗАПАЛ», 1998. 224 с.

Сатарова Т.М., Абраімова О.Є., Вінніков А.І., Черенков А.В. Біотехнологія рослин : навчальний посібник. Дніпропетровськ : Адверта, 2016. 136 с.

Стадник А.П., Мацкевич В.В., Філіпова Л.М., Пасічник Т.В. Деконтамінація та первинне культивування експлантів *Agapantussp. Агроекологічний журнал.* 2015. № 2. С. 106–111.

Субін О.В. Мікроклональне розмноження суниці садової (*Fragaria Ananassa Duch.*) сорту Аліна в культурі *in vitro. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Біологія, біотехнологія, екологія».* 2015. Вип. 214. С. 281–288.

Dixcon R.A. Plant cell culture a practical approach. Oxford – Washington, 1985. 236 p.

Hasegawa P.M. Factor affecting shoot and root initiation from culture rose shoot tip. *Journal of American Society for Horticultural Science.* 1980. № 115. pp. 216–220.

Lohar P.S. Textbook of Biotechnology. Hawthorne, CA : MJP Publisher, 2019. 774 p.

Mohamed A.E. Somaclonal variation in micro-propagated strawberry detected at the molecular level. *International Journal of Agriculture and Biology.* 2007. Vol. 9 (5). pp. 721–725.

References

Andriievskyi, V.V., Vrublevskyi, A.T., Filipova, L.M., Matskevych, V.V., & Matskevych, O.V. (2019). Problemy mikroklonalnoho rozmnozhennia funduka [Problems of hazelnut microclonal propagation]. *Ahrobiolohiia [Agribiology]*, 1, 74–84. https://doi.org/10.33245/2310-9270-2019-146-1-74-84 [in Ukrainian].

Voitovska, V.I., Zabolotna, A.V., Ketskalo, V.V., & Kovtuniuk, Z.I. (2023). Klonalne mikrorozmnozhennia indau posivnoho [Clonal micropropagation of sowing indica]. *Novitni ahrotekhnolohii [Advanced Agritechnologies]*, 11, 1. https://doi.org/10.47414/na.11.1.2023.277429 [in Ukrainian].

Denchylia-Sakal, H.M., Nikolaichuk, V.I., & Terek, V.O. (2010). Mikroklonalne rozmnozhennia roslyn Trifolium pretense L. [Microclonal propagation of Trifolium pretense L. plants]. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu. Seriia «Biolohiia» [Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series "Biology"]*, 28, 1–4 [in Ukrainian].

Ivchenko, T.V., Mozghovska, H.V., Vitsenia, T.I., Bashtan, N.O., & Miroshnychenko T.M. (2018). Metodychni pidkhody shchodo selektsii ta suchasnykh tekhnolohii rozmnozhennia i vyroshchuvannia batatu (Ipomoea batatas L.) (metodychni rekomendatsii) [Methodological approaches to breeding and modern technologies of reproduction and cultivation of sweet potato (Ipomoea batatas L.) (guidelines)]. Selektsiine : IOB NAAN. 36 p. [in Ukrainian].

Kunakh, V.A. (2005). Biotekhnolohiia likarskykh roslyn. Henetychni ta fizioloho-biokhimichni osnovy [Biotechnology of medicinal plants. Genetic, physiological and biochemical bases]. Kyiv. 730 p. [in Ukrainian].

Kushnir, H.P., & Sarnatska, V.V. (2005). Mikroklonalne rozmnozhennia roslyn. Teoriia i praktyka [Microclonal reproduction of plants. Theory and practice]. K. : Naukova dumka, 270 p. [in Ukrainian].

Kushnir, H.P. (2001). Stan i perspektyvy klonalnoho mikrorozmnozhennia roslyn v Ukraini [State and prospects of clonal micropropagation of plants in Ukraine]. *Henetyka i selektsiia v Ukraini na mezhi tysiacholit [Genetics and selection in Ukraine at the turn of the millennium]*, 1, 484–500 [in Ukrainian].

Lavrynenko, Yu.O., Balashova, H.S., & Bazalii, V.V. (2017). Formuvannia mikrobulb kartopli v kulturi in vitro zalezhno vid temperatury ta intensyvnosti osvitlenosti [Formation of potato microtubers in in vitro culture depending on temperature and light intensity]. *Faktory eksperymentalnoi evoliutsii orhanizmiv [Factors in experimental evolution of organisms]*, 21, 57–61 [in Ukrainian].

Lavrynenko, Yu.O., Balashova, H.S., & Kotova, O.I. (2016). Kultyvuvannia roslyn kartopli in vitro za mikroklonalnoho rozmnozhennia [Cultivation of potato plants in vitro by microclonal propagation]. *Visnyk ahrarnoi nauky [Bulletin of Agrarian Science]*, 11, 43–47 [in Ukrainian].

Lisovyi, M.M. (2017). Osoblyvosti otrymannia aseptychnoi kultury Thuja Occidentalis L. v umovakh in vitro [Some features of obtaining aseptic culture ofthuja occidentalis L. under in vitro conditions]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy [Scientific Bulletin of UNFU]*, 27 (9), 27–29. https://doi.org/10.15421/40270905 [in Ukrainian].

Matskevych, V.V., Podhaietskyi, A.A., & Filipova, L.M. (2019). Mikroklonalne rozmnozhennia okremykh vydiv roslyn (protokoly tekhnolohii): naukovo-praktychnyi posibnyk [Microclonal propagation of certain plant species (technology protocols): a scientific and practical guide]. Bila Tserkva, BNAU, 85 p. [in Ukrainian].

Matskevych, V.V., Filipova, L.M., & Oleshko O.H. (2022). Fiziolohiia ta biotekhnolohiia roslyn: pidruchnyk [Plant physiology and biotechnology: a textbook]. Bila Tserkva : BNAU, 427 p. [in Ukrainian].

Matskevych, O.V., Kimeichuk, I.V., Matskevych, V.V., & Pavlichenko, A.A. (2022). Trofichni ta fitohormonalni determinanty ontohenezu in vitro [Trophic and phytohormonal determinants of ontogenesis in vitro]. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Seriia «Ahronomiia i biolohiia» [Bulletin of Sumy National Agrarian University. Series "Agronomy and Biology"]*, 2 (48), 111–123. https://doi.org/10.32845/agrobio.2022.2.16 [in Ukrainian].

Melnychuk, M.D., Novak, T.V., & Kunakh, V.A. (2003). Biotekhnolohiia roslyn. Pidruchnyk [Plant biotechnology. Textbook.]. Kyiv : Polihrafkonsaltynh, 520 p. [in Ukrainian].

Oliinyk, O.O., Kliuvadenko, A.A., & Melnychuk, M.D. (2016). Pokrashchennia skladu seredovyshch dlia pidvyshchennia rostu i rozvytku troiandy efirooliinoi v kulturi in vitro [Improving the composition of media to enhance the growth and development of essential oil rose in vitro culture]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy [Scientific Bulletin of UNFU],* 26.7, 134–139 [in Ukrainian].

Podhaietskyi, A.A., Matskevych, V.V., & Podhaietskyi, A.An. (2018). Osoblyvosti mikroklonalnoho rozmnozhennia vydiv roslyn: monohrafiia [Features of microclonal reproduction of plant species: a monograph]. Bila Tserkva : BNAU,208 p. [in Ukrainian].

Rudyshyn, S.D. (1998). Osnovy biotekhnolohii roslyn: navchalnyi posibnyk [Fundamentals of plant biotechnology: a textbook]. Vinnytsia : MP «ZAPAL», 224 p. [in Ukrainian].

Satarova, T.M., Abraimova, O.Ie., Vinnikov, A.I., & Cherenkov A.V. (2016). Biotekhnolohiia roslyn : navchalnyi posibnyk [Plant biotechnology: a textbook]. Dnipropetrovsk : Adverta, 136 p. [in Ukrainian].

Stadnyk, A.P., Matskevych, V.V., Filipova, L.M., & Pasichnyk, T.V. (2015). Dekontaminatsiia ta pervynne kultyvuvannia eksplantiv Agapantussp [Decontamination and primary cultivation of Agapantussp explants]. *Ahroekolohichnyi zhurnal [Agroecological journal]*, 2, 106–111 [in Ukrainian].

Subin, O.V. (2015). Mikroklonalne rozmnozhennia sunytsi sadovoi (Fragaria Ananassa Duch.) sortu Alina v kulturi in vitro [Microclonal propagation of garden strawberry (Fragaria Ananassa Duch.) variety Alina in in vitro culture]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seriia «Biolohiia, biotekhnolohiia, ekolohiia» [Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series "Biology, Biotechnology, Ecology"],* 214, 281–288 [in Ukrainian].

Dixcon, R.A. (1985). Plant cell culture a practical approach. Oxford – Washington, 236 p. [in English].

Hasegawa, P.M. (1980). Factor affecting shoot and root initiation from culture rose shoot tip. *Journal of American Society for Horticultural Science*, 115, 216–220 [in English].

Lohar, P.S. (2019). Textbook of Biotechnology. Hawthorne, CA : MJP Publisher, 774 p. [in English].

Mohamed, A.E. (2007). Somaclonal variation in micro-propagated strawberry detected at the molecular level. *International Journal of Agriculture and Biology*, 9 (5), 721–725 [in English].

Отримано: 11.11.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

УДК 635.652:631.562:631.53.01:631.559
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.15

ВПЛИВ ЗАХОДІВ ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ ДОРОБКИ ТА ПЕРЕДПОСІВНОЇ ПІДГОТОВКИ НАСІННЯ НА ПОСІВНІ ЯКОСТІ ТА ВРОЖАЙНІСТЬ КВАСОЛІ ОВОЧЕВОЇ

І. І. Рожко[1], М. І. Кулик[2], А. П. Ракшеєв[3]

Дослідження, пов'язані з післязбиральною доробкою та передпосівною підготовкою насіння, є важливими задля забезпечення оптимальних умов росту і розвитку, формування якісного врожаю та насіннєвого матеріалу квасолі овочевої.
Основною метою статті є вивчення впливу заходів післязбиральної доробки та передпосівної підготовки на посівні якості насіння та врожайність квасолі овочевої сорту Ольга.
У дослідженнях використовувалися методики агрономічних досліджень, затверджені наукові рекомендації для проведення польових і лабораторних експериментів, а також методи математичної обробки отриманих даних.
Результати показали, що найкращі показники посівної придатності квасолі спостерігалися у варіантах сівби крупного насіння: енергія проростання становила 91,5%, лабораторна схожість – 95,1%. У середнього насіння ці показники були нижчими, а у мілкого – найгіршими.
Встановлено, що енергія проростання насіння квасолі порівняно з контролем (89,7%) знижувалася у насіння з макротравмами – на 3,7%, з середнім ступенем травм – на 2,7%, з мікротравмами – на 2,3% (на рівні контролю). Лабораторна схожість насіння порівняно з контролем (91,5%) знижувалася: для насіння з макротравмами – на 3,6%, з середнім ступенем травм – на 3,0%, з мікротравмами – на 2,1% (на рівні контролю).
Визначено, що застосовуючи допосівну обробку насіння квасолі сорту Ольга препаратом «Ризоактив Бобові» можливо підвищити польову схожість насіння (до 87,2%) та виживаність рослин квасолі (до 84,7%).

[1] доктор філософії,
доцент кафедри селекції, насінництва і генетики
(Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава)
e-mail: ilona.rozhko1@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0646-4004
[2] доктор сільськогосподарських наук, професор,
професор кафедри селекції, насінництва і генетики
(Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава)
e-mail: kulykmaksym@ukr.net
ORCID: 0000-0003-0394-5846
[3] здобувач вищої освіти
(Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава)
e-mail: andrii.raksheiev@st.pdau.edu.ua
ORCID: 0009-0005-0606-910X

У середньому за роки проведення експерименту на рівні контролю (1,39 т/га) врожайність насіння квасолі овочевої сорту Ольга формується за сівби насінням з обробкою препаратом «Ризоактив Бобові» (2 л/т) насіння з мікротравмами (1,36 т/га), а вихід кондиційного насіння становитиме 84,5%.
Таким чином, дослідження підтверджують важливість відбору насіння за крупністю (у процесі післязбиральної доробки) та доцільність застосування інокулянтів для досягнення високих показників врожайності та якості насіння квасолі, що має практичне значення для агрономів та фермерів.

Ключові слова: *квасоля овочева, сорт, післязбиральна доробка, передпосівна підготовка, посівні якості, травмування, інокуляція, врожайність, насіння.*

INFLUENCE OF POST-HARVEST TREATMENT AND PRE-SOWING SEED PREPARATION ON SOWING QUALITY AND YIELD OF VEGETABLE BEANS

I. I. Rozhko, M. I. Kulyk, A. P. Raksheev

Studies related to post-harvest processing and pre-sowing seed preparation are important to ensure optimal conditions for the growth, development, and formation of a quality crop and seed material of vegetable beans.
The main goal of the article is to study the impact of post-harvest processing and pre-sowing preparation on seed quality and yield of beans of the Olga vegetable variety.
The research used methods of agronomic research, approved scientific recommendations for conducting field and laboratory experiments, as well as methods of mathematical processing of the obtained data.
The results showed that the best indicators of bean sowing suitability were observed in the options for sowing large seeds: germination energy was 91.5%, laboratory germination was 95.1%. These indicators were lower in the medium seed, and the worst in the shallow seed.
It was established that the germination energy of bean seeds compared to the control (89.7%) decreased in seeds with macro injuries – by 3.7%, with medium injuries - by 2.7%, with microinjuries – by 2.3% (at the level of control). The laboratory germination of seeds compared to the control (91.5%) decreased: for seeds with macrotraumas – by 3.6%, with an average degree of trauma – by 3.0%, with microtraumas – by 2.1% (at the control level).
It was determined that by applying the pre-sowing treatment of beans of the Olga variety with the preparation «Rizoactive Beans» it is possible to increase the field germination of seeds (up to 87.2%) and the survival of bean plants (up to 84.7%).
On average, over the years of the experiment at the control level (1.39 t/ha), the yield of bean seeds of the Olga vegetable variety is formed by sowing seeds treated with the drug «Rizoactive Beans» (2 l/t) and seeds with microtraumas (1.36 t/ha), and the yield of conditioned seeds will be 84.5%
The research thus confirms the importance of seed sizing (in the post-harvest process) and the feasibility of using inoculants to achieve high yields and quality of bean seed, which is of practical importance to agronomists and farmers.

Key words: *vegetable beans, variety, post-harvest processing, pre-sowing preparation, sowing qualities, injury, inoculation, yield, seeds.*

Вступ

Високі врожаї квасолі овочевої формуються під дією багатьох чинників, одним з яких використання якісного насіннєвого матеріалу. Для сівби важливо вибрати добре розвинене, здорове, зріле та рівномірне за розміром насіння. Саме тому виробники повинні придбати насіння в сертифікованих насіннєвих компаній або використовувати якісне декларoване насіння (Петриченко та ін., 2005; Полянська та ін., 2008; Гайдай, 2017; Чорнолата та ін., 2022).

Сьогодні в Україні вирощується безліч сортів квасолі з різними характеристиками, адаптованими до різних умов (Державний реєстр сортів рослин, дата звернення 23.10.2024). Зазвичай вибір сорту залежить від вимог ринку, що включає уподобання покупців, такі як колір, розмір насінини, харчову цінність та спосіб використання. Однак більш вимогливі споживачі виокремлюють також критерії, які пов'язані з адаптивністю і потенціалом врожайності, оскільки квасоля вирощується в різноманітних системах землеробства та умовах навколишнього середовища. Крім цього, стійкість до шкідників і хвороб є критично важливою, адже широкий спектр шкідників і хвороб може пошкоджувати рослини на різних етапах їх росту й розвитку (Позняк, 2014). Проте тривалість вегетаційного періоду сортів також є важливим критерієм, особливо

в умовах непередбачуваних змін кількості та розподілу опадів. Тому аграрії повинні висівати ранньостиглі та посухостійкі сорти квасолі, які є стійкими до мінливих умов навколишнього середовища (Мазур, 2012; Горова та ін., 2014; Чинчик та ін., 2021).

Загальновідомо, що основними ознаками якості насіння квасолі є однорідність, висока схожість (більше 85%), вологість до 13%, чистота (98%) та відсутність пошкоджень та засміченості (ДСТУ 2240–93; ДСТУ 4794:2007; ДСТУ ЕЭК ООН FFV-06:2007; Ушкаренко та ін., 2017). Від цих показників залежить не лише якість сівби, а й подальший ріст та розвиток рослин.

Передпосівна обробка насіння є критично важливим етапом у вирощуванні овочевих культур, в тому числі і для квасолі овочевої. Правильно проведена обробка допомагає забезпечити високу схожість, стійкість рослин до біотичних чинників рослин і підвищення загальної продуктивності. Вона включає кілька ключових етапів, кожен з яких має своє значення (Руденко і Кунденко, 2020; Шовкова і Коротич, 2021).

На першому етапі важливо ретельно очистити насіння квасолі на предмет домішок: смітних і насінних, а також видалити хворі або пошкоджені насінини. Цей процес може включати механічні методи, такі як просіювання або сортування. Основні переваги очищення насіння полягають у зменшенні ризику поширення хвороб та забезпечення рівномірності сівби та якості посівного матеріалу. Проте цей етап потребує додаткових зусиль і часу, що може бути проблематичним для великих господарств (Голодна та ін., 2014; Труш та ін., 2018; Цибрій-Сівак і Бахмат, 2021).

Наступним етапом є протруювання насіння, яке здійснюється шляхом обробки спеціальними препаратами, такими як фунгіциди та інсектициди. Це важливий захід, оскільки він допомагає захистити насіння від хвороб і шкідників, зокрема від грибкових інфекцій. Переваги протруювання включають підвищення виживаності насіння та зменшення ризику ураження хворобами на ранніх стадіях росту рослин. Однак варто враховувати, що цей процес супроводжується додатковими витратами на закупівлю препаратів та може мати негативний вплив на навколишнє середовище, якщо не дотримуватись рекомендацій (Тимошенко і Вечера, 2010).

Інокуляція – це процес внесення спеціальних бактерій у ґрунт або безпосередньо на насіння, що сприяє покращенню його проростанню. При інокуляції квасолі овочевої важливо правильно вибрати насіннєвий матеріал, стійкий до хвороб і адаптований до умов вирощування. Обробка насіння спеціальною бактеріальною суспензією *Rhizobium* може здійснюватися вручну або за допомогою спеціальних обробних машин. Для цього насіння слід зволожити водою або спеціальним розчином (наприклад, з цукром), щоб бактерії краще прилипали. Після обробки насіння потрібно підсушити до сипкого стану (Шувар та ін, 2014; Крутило і Данилюк, 2008).

При обробці насіння квасолі суспензією *Rhizobium* можна використовувати кілька методів: обробка у сухому вигляді, водна обробка та змішування з добривами. За умови обробки у сухому вигляді насіння змішують із сухими гранулами бактерій. Цей метод є простим, але менш ефективним, оскільки бактерії можуть не активуватися. У випадку водної обробки насіння спочатку зволожують, а потім обробляють бактеріальною суспензією, що сприяє кращому прилипанню бактерій до насінини. Нанесення спеціальної бактеріальної суспензії за рахунок добрив, які містять *Rhizobium*, підвищує шанси на успішне колонізування на кореневій системі рослин (Крутило і Данилюк, 2008).

Застосування якісних інокулянтів з високим вмістом азотфіксуючих бактерій для обробки насіння бобових культур сьогодні є необхідністю, оскільки дає змогу повною мірою реалізувати генетичний потенціал сучасних сортів, забезпечуючи найвищі врожаї за найкращої окупності затрат на вирощування. Застосування інокулянтів, що містять сучасні високоефективні штами *Rhizobium*, гарантує, що кожна насінина має достатню кількість активних бактерій. Однак, при цьому важливо враховувати специфічність бактерій до певних видів квасолі та необхідність дотримання оптимальних умов для їх розвитку (температура, вологість).

У результаті, інокуляція насіння квасолі овочевої сприяє утворенню кореневих бульбочок, які фіксують азот з повітря та забезпечують його рослинам. Це також покращує родючість ґрунту та можливість використання післядії накопиченого азоту в ґрунті наступним культурам у сівозміні.

Таким чином, комплексна передпосівна обробка насіння є запорукою високих показників урожайності та якості продук-

ції квасолі, а правильний підхід до кожного з етапів дозволяє не лише підвищити схожість насіння, а й забезпечити ріст і розвиток рослин близький до оптимального протягом усього вегетаційного періоду. Саме вивченню цих питань і присвячена дана публікація.

Мета дослідження – встановити вплив заходів післязбиральної доробки та передпосівної підготовки насіння на посівні якості насіннєвого матеріалу та врожайність квасолі овочевої.

Матеріал і методи

Польові дослідження були проведені на дослідній ділянці навчально-наукового інституту агротехнологій, селекції та екології «Вивчення енергетичних та польових культур» на базі Полтавського державного аграрного університету. Квасолю вирощували в умовах міні-сівозміни, де попередником була озима пшениця. Дослідна ділянка мала рівномірну площинну проекцію та була без нахилу.

Агрохімічні показники ґрунту дослідної ділянки мали наступні показники (табл. 1).

Таблиця 1

Агрохімічні показники ґрунту

Показник	**Значення**
Вміст гумусу	4,82 %
Лужногідролізований азот	154,0 мг/кг ґрунту
Фосфор	1095,0 мг/кг ґрунту
Калій	675,0 мг/кг ґрунту
Кальцій	12,9 мг-екв/100 г ґрунту
Магній	1,75 мг-екв/100 г ґрунту
pH сольове	6,47

Програма досліджень передбачала проведення однофакторного досліду з вивчення заходів післязбиральної доробки, передпосівної підготовки насіння та врожайність квасолі овочевої сорту Ольга. Для цього було проведено польовий та лабораторні досліди, що здійснено відповідно рекомендацій дослідної справи в агрономії (Тимошенко та ін., 2004; Рожков та ін., 2016). Лабораторний здійснено відповідно до ДСТУ 2240 – 93; ДСТУ 4138-2002; ДСТУ 7160:2020; ДСТУ 8779:2018.

Лабораторні досліди передбачали:

– визначення впливу крупності насіння (за масою 1000 насінин – надалі МТН) на посівні якості квасолі: вар. 1 – суміш насіння, МТН 200,0 г (контроль), вар. 2 – крупне насіння (МТН > 200,0 г), вар. 3 – середнє насіння (МТН = 150,0 г), вар. 4 – дрібне насіння (МТН < 150,0 г).

– визначення впливу ступеня травмування насіння на посівні якості квасолі: вар. 1 – не травмоване насіння (контроль), вар. 2 – макротравми в насінні, вар. 3 – насіння з середнім ступенем травмування, вар. 4 – мікротравми в насіння.

Польові дослідження поєднували:

– встановлення впливу заходів післязбиральної доробки насіння на врожайність квасолі овочевої сорту Ольга: вар. 1 – не оброблене насіння (контроль), вар. 2 – мікротравми в насіння (не оброблене), вар. 3 – оброблене насіння з мікротравмами, вар. 4 – оброблене насіння з макротравмами;

– визначення впливу інокуляції на польову схожість насіння ступеня виживаності рослин квасолі овочевої сорту Ольга за варіантами досліду: вар. 1 – не оброблене насіння (контроль), вар. 2 – мікротравми в насінні (не оброблене), вар. 3 – оброблене насіння з мікротравмами, вар. 4 – оброблене насіння з макротравмами.

Агротехніка вирощування квасолі овочевої рекомендована для зони вирощування, окрім чинників що були поставлені на вивчення.

Поділ насіння квасолі овочевої сорту Ольга за крупністю здійснювали шляхом відбору його за масою 1000 насінин на фракції. При визначенні ступеня травмованості насіння його поділяли на: нетравмоване, сильнотравмоване, середньотравмоване, слаботравмоване.

Облік врожайності здійснювали поділяночно, з обмолотом й очищенням насіння.

Під час визначення показників посівної придатності використовували чотирикратну повторність закладки насіння на пророщування у ростильні згідно відповідних методик (ДСТУ 2240–93).

Польовий дослід має чотирикратну повторність, варіанти закладені систематичним методом (табл. 2).

Під час вивчення впливу застосування допосівної обробки насіння препарату квасолі овочевої сорту Ольга нами застосовано інокулянт «Ризоактив Бобові» (Виробництво …, 2024; Інокулянти …, 2024). Даний інокулянт зареєстрований в Україні, мітить ефективні штами мікроорганізмів – симбіотів азотфіксуючих бактерій. Норма витрати «Ризоактив Бобові» становить 2 л/т.

Статистичний обрахунок цифрових даних з дослідів здійснювали відповідно рекомендацій (Ермантраут та ін., 2007).

Таблиця 2

Схема експерименту

Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 4
Вар. 2	Вар. 3	Вар. 4	Вар. 1
Вар. 3	Вар. 4	Вар. 1	Вар. 2
Вар. 4	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3
1 повторення	2 повторення	3 повторення	4 повторення

Примітка:
вар. 1 – не оброблене насіння (контроль);
вар. 2 – мікротравми в насінні (не оброблене);
вар. 3 – оброблене насіння з макротравмами;
вар. 4 – оброблене насіння з мікротравмами.

Результати та їх обговорення

Вплив крупності насіннєвого матеріалу на посівні якості квасолі

Під час вивчення впливу крупності насіння квасолі овочевої сорту Ольга на його посівні якості встановлено значне варіювання даних показників. Енергія проростання насіння варіювала за варіантами досліду – 89,5 від до 91,9%, а лабораторна схожість – від 90,8 до 95,6% (табл. 3, рис. 1).

В умовах 2023 року енергія проростання насіння квасолі овочевої сорту Ольга залежно від крупності варіювала за варіантами досліду – від 90,1 до 91,9%, а лабораторна схожість – від 91,7 до 95,6%. Найбільші показники були на варіантах крупного насіння культури. При цьому показник енергії проростання зріс до контролю (+1,6%) та лабораторна схожість (2,9+%). На варіантах середнього насіння, показники мали істотне зниження порівняно з крупним та були вище ніж на контролі. Енергія проростання та лабораторна схожість дрібного насіння мали тотожні показники з контрольними варіантами.

У 2024 році, порівняно з 2023 роком – спостерігалось зниження посівної придатності насіння квасолі овочевої сорту Ольга на усіх варіантах досліду. Мінливість енергії проростання була в межах – від 89,5 до 91,0%, а лабораторна схожість насіння – від 90,8 до 94,5%. Найліпші показники посівної придатності насіння відмічено на варіантах крупного насіння: енергія проростання (+1,3% до контролю) та лабораторна схожість (+3,0%), суттєво менші дані показники були у середнього за крупністю насіння, а найгірші – на варіантах мілкого насіння.

Таким чином, нами підтверджено гіпотезу про те, що крупність насіння має вплив

Таблиця 3

Вплив крупності насіння на посівні якості квасолі овочевої сорту Ольга, 2023–2024 рр.

Варіанти*	**Енергія проростання**	**+ / – до контролю**	**Лабораторна схожість**	**+ / – до контролю**
2023 рік				
вар. 1	90,3	–	92,7	–
вар. 2	91,9	1,6	95,6	2,9
вар. 3	91,0	0,7	93,8	1,1
вар. 4	90,1	-0,2	91,4	-1,3
середнє	90,8		93,4	
$НІР_{05}$	0,4	–	0,5	–
2024 рік				
вар. 1	89,7	–	91,5	–
вар. 2	91,0	1,3	94,5	3,0
вар. 3	90,1	0,4	93,7	2,2
вар. 4	89,5	-0,2	90,8	-0,7
середнє	90,1		92,6	
$НІР_{05}$	0,3	–	0,7	–

Примітка: вар. 1 – суміш насіння (контроль), вар. 2 – крупне насіння, вар. 3 – середнє насіння, вар. 4 – дрібне насіння.

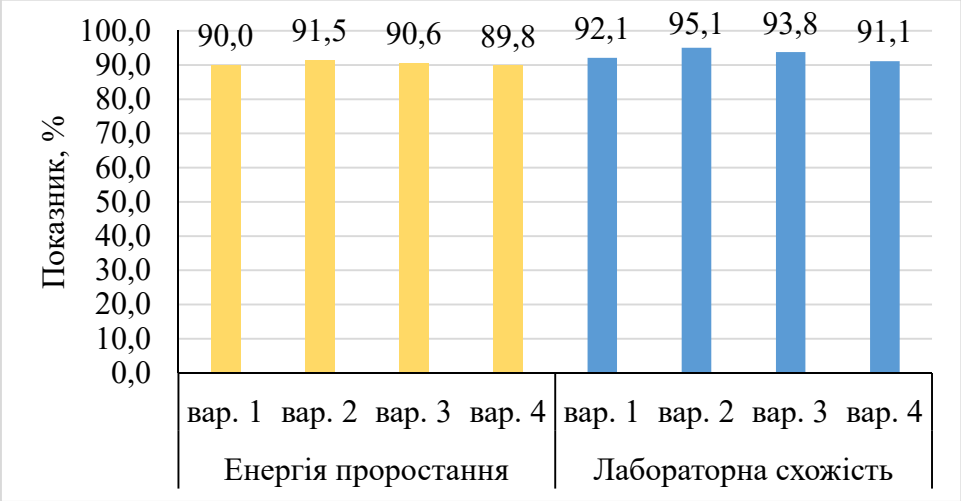


Рис. 1. Вплив крупності насіння на посівні якості квасолі овочевої сорту Ольга, середнє за 2023–2024 р.

Примітка: вар. 1 – суміш насіння (контроль), вар. 2 – крупне насіння, вар. 3 – середнє насіння, вар. 4 – дрібне насіння.

на посівні якості його. У крупного насіння квасолі овочевої сорту Ольга відмічено суттєве зростання енергії проростання (91,5%) та лабораторної схожості насіння (95,1%).

Вплив ступеня травмування насіннєвого матеріалу на посівні якості квасолі овочевої

За вивчення ступеня травмування на посівні якості насіння нами його розділено на чотири фракції за крупністю: вар. 1 – не травмоване насіння (контроль), вар. 2 – макротравми в насінні, вар. 3 – насіння з середнім ступенем травмування, вар. 4 – мікротравми в насіння (табл. 4, рис. 2).

Насіння квасолі овочевої сорту Ольга, що травмоване – в тій чи іншій мірі однозначно погіршує свої посівні якості. В умовах 2023 року енергія проростання насіння порівняно з контролем (90,3%) знижувалася: з макротравмами – на 3,9%, з середнім ступенем травм – на 2,8%, з мікротравмами – на 1,9%. Аналогічна тенденція від-

Таблиця 4

Вплив ступеня травмування насіння на посівні якості квасолі овочевої сорту Ольга, 2023–2024 рр.

Варіанти*	**Енергія проростання**	**+ / – до контролю**	**Лабораторна схожість**	**+ / – до контролю**
2023 р.				
вар. 1	90,3	–	91,7	–
вар. 2	86,4	-3,9	88,5	-3,2
вар. 3	87,5	-2,8	89,1	-2,6
вар. 4	88,4	-1,9	90,5	-1,2
середнє	88,2		90,0	
$НІР_{05}$	1,1	–	0,7	–
2024 р.				
вар. 1	89,7	–	91,5	–
вар. 2	86,0	-3,7	87,9	-3,6
вар. 3	87,0	-2,7	88,5	-3,0
вар. 4	87,4	-2,3	89,4	-2,1
середнє	87,5		89,3	
$НІР_{05}$	1,4	–	1,5	–

Примітка: вар. 1 – не травмоване насіння (контроль), вар. 2 – макротравми в насінні, вар. 3 – насіння з середнім ступенем травмування, вар. 4 – мікротравми в насінні.

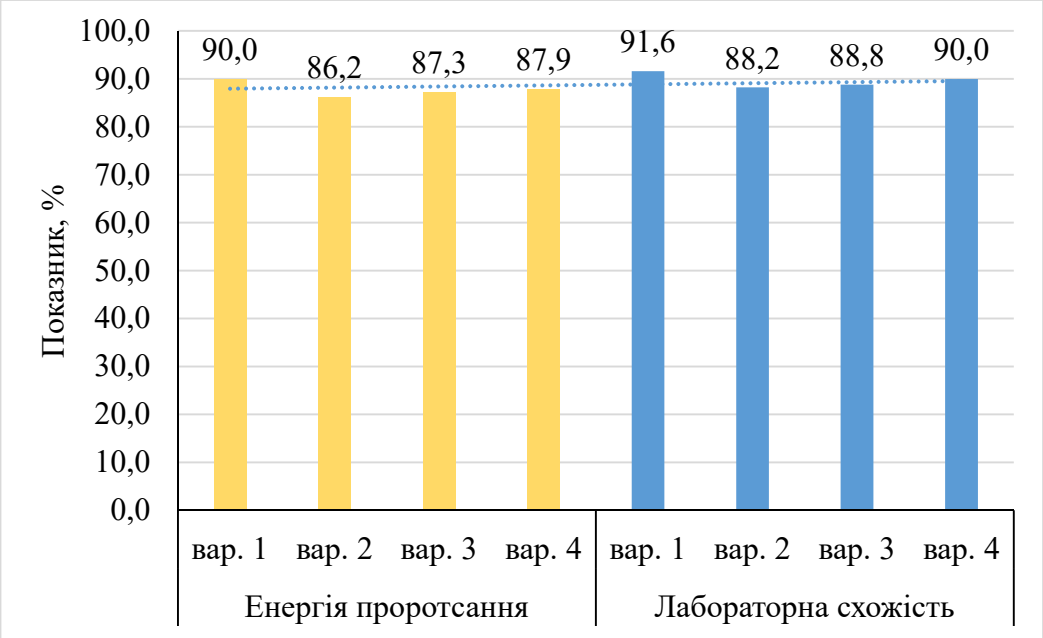


Рис. 2. Вплив ступеня травмування насіння на посівні якості квасолі овочевої сорту Ольга, середнє за 2023–2024 рр.

Примітка: вар. 1 – не травмоване насіння (контроль), вар. 2 – макротравми в насінні, вар. 3 – насіння з середнім ступенем травмування, вар. 4 – мікротравми в насіння.

мічена з лабораторною схожістю насіння. Порівняно з контролем (91,7%) цей показник знижувався: для насіння з макротравмами – на 3,2%, з середнім ступенем травм – на 2,6%, з мікротравмами – на 1,2%.

Для умов 2024 року також відмічене зниження даних показників за ступенем травмування насіння квасолі овочевої сорту Ольга. При цьому визначено, що енергія проростання насіння порівняно з контролем (89,7%) знижувалася: з макротравмами – на 3,7%, з середнім ступенем травм – на 2,7%, з мікротравмами – на 2,3%. Лабораторна схожість насіння порівняно з контролем (91,5%) знижувалася: для насіння з макротравмами – на 3,6%, з середнім ступенем травм – на 3,0%, з мікротравмами – на 2,1%.

Отже, ступінь травмування насіння квасолі має значний вплив на лабораторну схожість насіння.

Вплив інокуляції на польову схожість насіння та виживаність рослин квасолі

Показники польової схожості насіння та виживаність рослин квасолі овочевої сорту Ольга різнилися за варіантами досліду та роками проведення експерименту (табл. 5, рис. 3).

Застосування інокуляції насіння на його польову схожість та виживаність рослин квасолі овочевої сорту Ольга однозначно мало вплив на ці показники. В умовах 2023 року на рівні контролю (90,2%) отримали польову схожість насіння на варіантах обробки насіння з мікротравмами (89,6%) за $НІР_{05}$ 0,6. В умовах 2024 року – однакову з контролем (89,5%) отримали польову схожість насіння на варіантах обробки насіння з мікротравмами (88,9%) за $НІР_{05}$ 0,9. На інших варіантах спостерігали суттєве зниження даного показника, що було характерно для обох років дослідження.

Ступінь виживаності рослин квасолі овочевої сорту Ольга у 2023 році варіював – від 84,0 до 85,0%, а у 2024 році – від 83,1 до 84,4%, з найбільшим значенням на варіантах контролю та сівби насіння з мікротравмами за умови його обробки препаратом «Ризоактив Бобові».

Таким чином, експериментом встановлено, що застосування у допосівну підготовку насіння препарату «Ризоактив Бобові» суттєво підвищує польову схожість насіння та виживаність рослин квасолі овочевої сорту Ольга.

Вплив заходів післязбиральної доробки насіння на врожайність квасолі

За визначення продуктивності квасолі овочевої сорту Ольга встановлено варіювання врожайності насіння та його

Таблиця 5

Вплив інокуляції на польову схожість насіння та виживаність рослин квасолі овочевої сорту Ольга, 2023–2024 рр.

Варіанти*	**Польова схожість, %**	**+ / – до контролю**	**Виживаність рослин, %**	**+ / – до контролю**
2023 р.				
вар. 1	90,2	–	85,0	–
вар. 2	85,4	-4,8	84,3	-0,7
вар. 3	86,1	-4,1	84,0	-1,0
вар. 4	89,6	-0,6	84,8	-0,2
середнє	87,8		84,5	
$НІР_{05}$	0,6	–	0,4	–
2024 р.				
вар. 1	89,5	–	84,4	–
вар. 2	84,9	-4,6	83,2	-1,2
вар. 3	85,7	-3,8	83,1	-1,3
вар. 4	88,9	-0,6	84,1	-0,3
середнє	87,3		83,7	
$НІР_{05}$	0,9	–	0,6	–

Примітка: вар. 1 – не оброблене насіння (контроль), вар. 2 – мікротравми в насіння (не оброблене), вар. 3 – оброблене насіння з макротравмами, вар. 4 – оброблене насіння з мікротравмами.

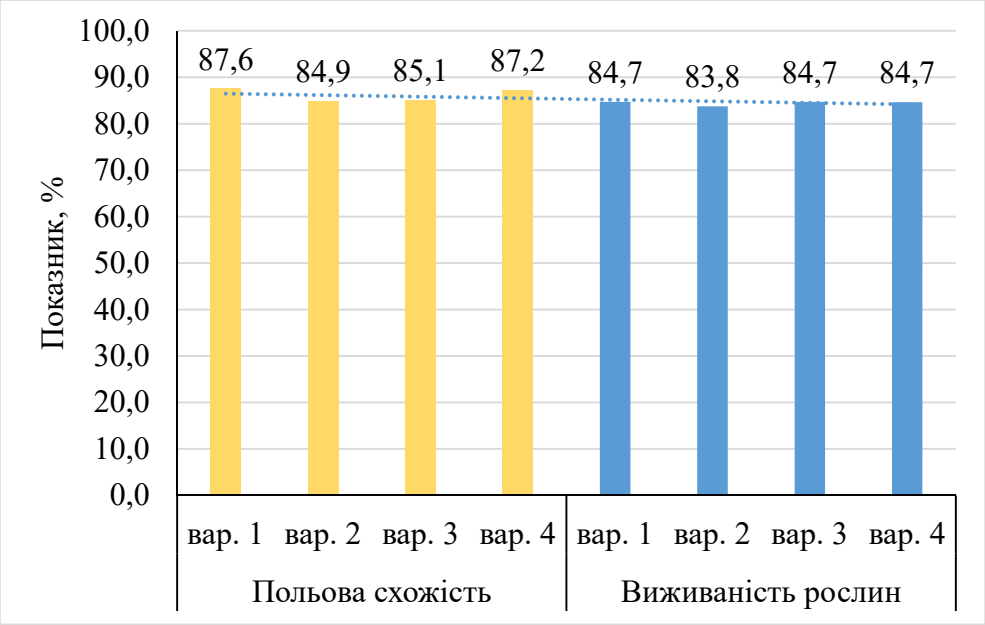


Рис. 3. Вплив інокуляції польову схожість насіння та виживаність рослин квасолі овочевої сорту Ольга, середнє за 2023–2024 рр.

Примітка: вар. 1 – не оброблене насіння (контроль), вар. 2 – мікротравми в насіння (не оброблене), вар. 3 – оброблене насіння з мікротравмами, вар. 4 – оброблене насіння з макротравмами.

виходу за варіантами досліду при застосуванні препарату, яким обробляли насіння з різним ступенем травмування (табл. 6, 7, рис. 4, 5).

Варіювання врожайності квасолі овочевої сорту Ольга для умов 2023 року було – від 1,31 до 1,47 т/га, а виживаність рослин – від 84,3 до 85,1%. При цьому на рівні контрольних варіантів досліду (1,45 т/га) врожайність формувалася на варіантах обробки препаратом «Ризоактив Бобові» насіння з мікротравмами (1,47 т/га) за $НІР_{05}$ 0,03. Сівба необробленого насінням з мікротравмами та обробленого з макротравмами не

Таблиця 6

Вплив інокуляції на врожайність та вихід насіння квасолі овочевої сорту Ольга, 2023 р.

Варіанти*	**Загальна врожайність, т/га**	**+ / – до контролю**	**Вихід насіння, %**	**+ / – до контролю**
вар. 1	1,45	–	85,1	–
вар. 2	1,31	-0,14	84,3	-0,8
вар. 3	1,36	-0,09	84,4	-0,7
вар. 4	1,47	+0,02	85,0	-0,01
середнє	1,40		84,7	
$НІР_{05}$	0,03	–	0,05	–

Примітка: вар. 1 – не оброблене насіння (контроль), вар. 2 – мікротравми в насінні (не оброблене), вар. 3 – оброблене насіння з макротравмами, вар. 4 – оброблене насіння з мікротравмами.

Таблиця 7

Вплив інокуляції на врожайність та вихід насіння квасолі овочевої сорту Ольга, 2024 р.

Варіанти*	**Загальна врожайність, т/га**	**+ / – до контролю**	**Вихід насіння, %**	**+ / – до контролю**
вар. 1	1,32	–	84,1	–
вар. 2	1,21	-0,11	82,8	-1,13
вар. 3	1,19	-0,13	83,0	-1,10
вар. 4	1,39	+0,03	83,9	-0,02
середнє	1,28		83,5	
$НІР_{05}$	0,05	–	0,04	–

Примітка: вар. 1 – не оброблене насіння (контроль), вар. 2 – мікротравми в насіння (не оброблене), вар. 3 – оброблене насіння з макротравмами, вар. 4 – оброблене насіння з мікротравмами.

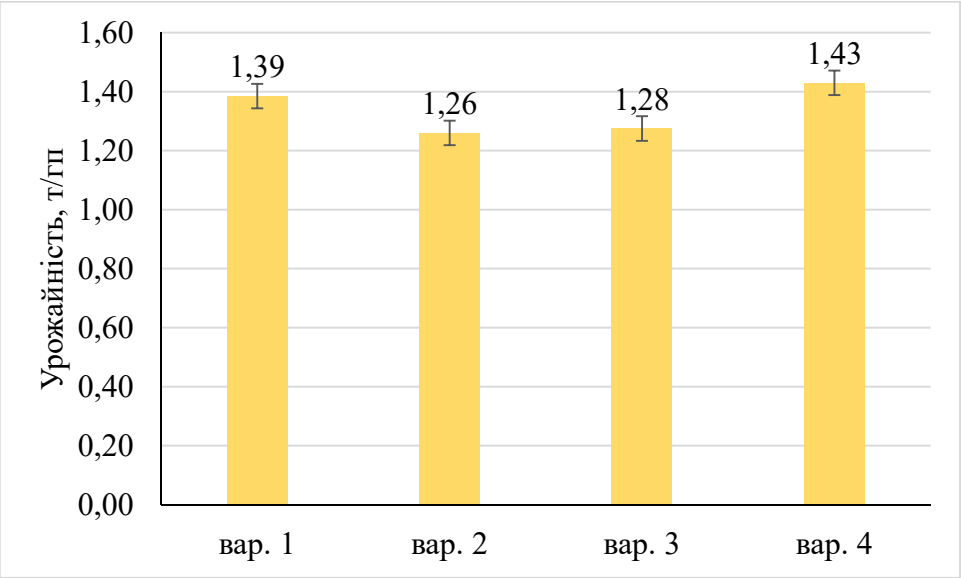


Рис. 4. Вплив інокуляції на врожайність насіння квасолі овочевої сорту Ольга, середнє за 2023–2024 рр.

Примітка: вар. 1 – не оброблене насіння (контроль), вар. 2 – мікротравми в насінні (не оброблене), вар. 3 – оброблене насіння з мікротравмами, вар. 4 – оброблене насіння з макротравмами.

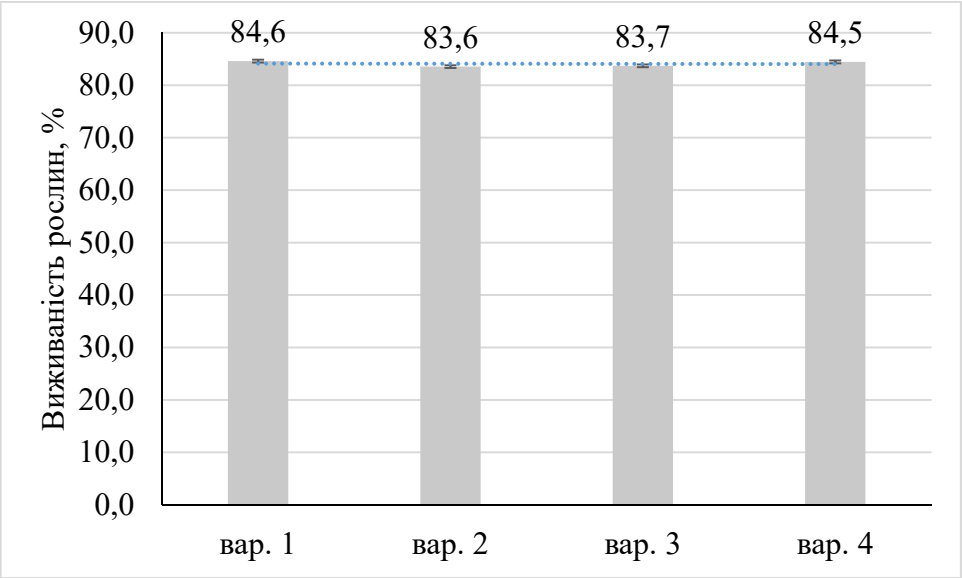


Рис. 5. Вплив інокуляції на вихід насіння квасолі, середнє за 2023–2024 рр.

Примітка: вар. 1 – не оброблене насіння (контроль), вар. 2 – мікротравми в насінні (не оброблене), вар. 3 – оброблене насіння з мікротравмами, вар. 4 – оброблене насіння з макротравмами.

призводило до суттєвого збільшення цього показника. Навпаки – фіксували зниження продуктивності, відповідно варіантів на: 0,14 та 0,09 т/га.

Для умов 2024 року врожайність квасолі овочевої сорту Ольга варіювала в межах від 1,18 до 1,39 т/га, а виживаність рослин – від 82,8 до 84,1%. Встановлено, що на рівні контролю (1,32 т/га) врожайність формувалася на варіантах з обробкою «Ризоактив Бобові» насіння з мікротравмами (1,39 т/га) за $НІР_{05}$ 0,05. Сівба необробленого насінням з мікротравмами та обробленого з макротравмами істотно не збільшувала цей показник. Відмічено зниження врожайності, відповідно варіантів на: 0,11 та 0,13 т/га.

У середньому за роки проведення експерименту на рівні контролю (1,39 т/га) врожайність насіння квасолі овочевої сорту Ольга формується за сівби насінням з обробкою «Ризоактив Бобові» насіння з мікротравмами (1,36 т/га). При цьому вихід кондиційного насіння становив 84,5% (рис. 4, 5). Це свідчить про те, що застосування заходів допосівної підготовки насіння дозволяє використовувати для сівби насіння з мікротравмами. Врожайність буде на рівні контрольних варіантів, де обробку насіння квасолі овочевої сорту Ольга не проводили.

Висновки

У середньому за роки дослідження найліпші показники посівної придатності квасолі овочевої сорту Ольга визначено на варіантах сівби крупного насіння: енергія проростання (91,5%) та лабораторна схожість (95,1%), менші показники були у середнього насіння, а найгірші – на варіантах мілкого насіння.

Визначено, що енергія проростання насіння квасолі овочевої сорту Ольга порівняно з контролем (89,7%) знижувалася: з макротравмами – на 3,7%, з середнім ступенем травм – на 2,7%, з мікротравмами – на 2,3% (на рівні контролю). Лабораторна схожість насіння порівняно з контролем (91,5%) знижувалася: для насіння з макротравмами – на 3,6%, з середнім ступенем травм – на 3,0%, з мікротравмами – на 2,1% (на рівні контролю).

Дослідження показали, що застосовуючи допосівну обробку насіння квасолі овочевої сорту Ольга препаратом «Ризоактив Бобові» спостерігається підвищення польової схожості насіння (до 87,2%) та виживаність рослин квасолі (до 84,7%).

У середньому за роки проведення експерименту на рівні контролю (1,39 т/га) врожайність насіння квасолі овочевої сорту Ольга формується за сівби насінням з обробкою «Ризоактив Бобові» насіння з мікротравмами (1,36 т/га), а вихід кондиційного насіння становитиме 84,5%.

Список використаної літератури

Виробництво українських біопрепаратів BioNorma. [Електронний ресурс]. URL: https://bionorma.ua/vyrobnytstvo/ (дата звернення 23.10.2024).

Гайдай Л.С. Індивідуальна продуктивність і урожайність квасолі звичайної в умовах Правобережного Лісостепу України. *Сільське господарство та лісівництво.* 2017. Т. 1, № 7. С. 168–177.

Голодна А.В., Акуленко В.В., Столяр О.О. Урожайність квасолі звичайної залежно від сорту, удобрення, норми висівання та обробляння насіння в північній частині Лісостепу. *Корми і кормовиробництво.* 2014. Вип. 79. С. 164–169.

Горова Т.К., Сайко О.Ю., Черкасова В.К. Особливості формування фаз вегетаційного періоду квасолі звичайної. *Вісник Центру наукового забезпечення АПВ Харківської області.* 2014. Вип. 17. С. 88–96.

Державний реєстр сортів рослин, придатних для поширення в Україні. [Електронний ресурс]. URL: https://minagro.gov.ua/file-storage/reyestr-sortiv-roslin (дата звернення 23.10.2024).

ДСТУ 2240 – 93 Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови.

ДСТУ 4138-2002. Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості: К.: Держспоживстандарт України, 2003.

ДСТУ 4794:2007 «Квасоля. Технологія вирощування. Загальні вимоги».

ДСТУ ЕЭК ООН FFV-06:2007 Квасоля. Настанови щодо постачання і контролювання якості.

ДСТУ 7160:2020 Насіння овочевих, баштанних, кормових і пряно-ароматних культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови.

ДСТУ 8779:2018 Овочеві культури. Методи визначення ураження хворобами.

Ермантраут Е.Р., Присяжнюк О.І., Шевченко І.Л. Статистичний аналіз агрономічних дослідних даних в пакеті Statistica – 6 : *Методичні вказівки.* Київ : ПоліграфКонсалтинг, 2007. 55 с.

Інокулянти Ризоактив Бобові (BioNorma). [Електронний ресурс]. URL: https://superagronom.com/pesticidi-regulyatori-rostu/rizoaktiv-bobovi-id9570 (дата звернення 23.10.2024).

Крутило Д.В., Данилюк В.Г. Реакція сортів квасолі на інокуляцію Rhizobium phaseoli за наявності в ґрунті численної популяції ризобій. *Корми і кормовиробництво: міжвідомомчий тематичний науковий збірник.* Вінниця : ФОП, 2008. № 61. С. 78–83.

Мазур О.В. Вивчення зв'язку тривалості вегетаційного періоду з урожайністю сортів рослин сої. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету.* 2012. Вип. 10(50) С. 100–105.

Петриченко В.Ф., Бугайов В.Д., Антонів С.Ф. Технології вирощування бобових та злакових трав на насіння. Вінниця. 2005. 52 с.

Позняк О.В. *Phaseolus lunatus L.* – Перспективний для вирощування в україні вид бобових. 2014. С. 111 – 122. [Електронний ресурс]. URL: http://www.dsmayak.com.ua/files/agrarna-nauka-2020.pdf#page=111 (дата звернення 23.10.2024).

Полянська Л., Чалий О., Гуторова О., Свиридов О. Квасоля в сучасних умовах господарювання. 2008. [Електронний ресурс]. URL: https://propozitsiya.com/ua/kvasolya-v-suchasnih-umovah-gospodaryuvannya (дата звернення 23.10.2024).

Рожков А.О., Пузік В.К., Каленська С.М., Пузік Л.М., Попов С.І., Музафаров Н.М., Бухало В.Я., Криштоп Є.А. Дослідна справа в агрономії: навч. посібник: у 2 кн. – Кн. 1. Теоретичні аспекти дослідної справи / А. О. Рожков, В. К. Пузік, С. М. Каленська та ін.; за ред. А. О. Рожкова. Х. : Майдан, 2016. 316 с.

Руденко А.Ю., Кунденко М.П. Аналіз сучасних методів передпосівної обробки зернових культур. *Матеріали XXI Міжнародної наукової конференції „Сучасні проблеми землеробської механіки".* 2020. С. 103. [Електронний ресурс]. URL: http://surl.li/ichifi (дата звернення 23.10.2024).

Тимошенко І.І., Майщук З.М., Косилович Г.О. Основи наукових досліджень в агрономії. Навчальний Посібник. Львів. 2004. 121 с. [Електронний ресурс]. URL: http://surl.li/pzekci (дата звернення 23.10.2024).

Тимошенко С.П., Вечера О.М. Протруювання насіння – стан, проблеми і досягнення. *Механізація та електрифікація сільського господарства.* 2010. № 94. С. 196–206.

Труш О.К., Бобро М.А., Рожков А.О. Вплив передпосівної обробки бактеріальними препаратами насіння квасолі на основні елементи структури врожаю. *Селекція і насінництво.* 2018. № 114. С. 120–127.

Ушкаренко В.О., Лавренко С.О., Максимов Д.О. Урожайність та якість зерна квасолі залежно від обробітку ґрунту, мінеральних добрив та ширини міжряддя при зрошенні. *Наука в Південному регіоні України. Важливі досягнення наукових установ Південного регіону України в галузі фундаментальних, прикладних досліджень та інноваційної діяльності: наукове видання.* Одеса. 2017. Вип. XV. С. 72.

Цибрій-Сівак Н.В., Бахмат М.І. Недоліки, які трапляються при зберіганні квасолі. *IV Всеукраїнська наукова інтернет-конференція Інноваційні технології в рослинництві.* 2021. С. 155–156. [Електронний ресурс]. URL: http://188.190.43.194:7980/jspui/bitstream/123456789/10489/1/155-156.pdf (дата звернення 23.10.2024).

Чинчик О.С., Оліфірович С.Й., Оліфірович В.О. Тривалість вегетації та продуктивність сортів квасолі звичайної в умовах Південної частини Лісостепу західного. *Агробіологія.* 2021. № 1. С. 166–172.

Чорнолата Л., Погоріла Л., Пирин Н., Здор Л. Якісний насіннєвий матеріал запорука хорошого врожаю. *Матеріали XIV Міжнародної наукової конференції «Корми і кормовий білок». Інститут кормів та сільського господарства Поділля НААН.* Вінниця. 2022. С. 150–153. [Електронний ресурс]. URL: https://fri.vin.ua/wp-content/uploads/2022/10/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D0%B8_%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84_2022-2.pdf#page=150 (дата звернення 23.10.2024).

Шовкова О.В., Коротич Є. В. Ефективність мікродобрив для передпосівної обробки насіння сої. *Scientific Progress & Innovations.* 2021. Вип. 4. С. 98–102. https://doi.org/10.31210/visnyk2021.04.12.

Шувар А.М., Свідерко М.С., Беген Л.Л., Терешко Р.В. Урожай і якість зерна квасолі залежно від застосування біологічних препаратів. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво.* 2014. Вип. 56. С. 183–190.

References

Vyrobnytstvo ukrainskykh biopreparativ BioNorma. [Production of Ukrainian biological preparations BioNorma] [Electronic resource] URL: https://bionorma.ua/vyrobnytstvo/ (access date 23.10.2024) [in Ukrainian].

Haidai, L.S. (2017). Indyvidualna produktyvnist i urozhainist kvasoli zvychainoi v umovakh Pravoberezhnoho Lisostepu Ukrainy [Individual productivity and yield of common bean in the conditions of the Right Bank Forest Steppe of Ukraine]. *Silske hospodarstvo ta lisivnytstvo [Agriculture and forestry],* 1 (7), 168–177 [in Ukrainian].

Holodna, A.V., Akulenko, V.V., & Stoliar, O.O. (2014). Urozhainist kvasoli zvychainoi zalezhno vid sortu, udobrennia, normy vysivannia ta obrobliannia nasinnia v pivnichnii chastyni Lisostepu [The yield of common beans depending on the variety, fertilizer, sowing rate and seed treatment in the northern part of the Forest Steppe] *Kormy i kormovyrobnytstvo [Fodder and fodder production],* 79, 164–169 [in Ukrainian].

Horova, T.K., Saiko, O.Yu., & Cherkasova, V.K. (2014). Osoblyvosti formuvannia faz vehetatsiinoho periodu kvasoli zvychainoi [Peculiarities of the formation of phases of the growing season of common beans]. *Visnyk Tsentru naukovoho zabezpechennia APV Kharkivskoi oblasti [Bulletin of the Center for Scientific Support of APV of Kharkiv Region]* 17, 88–96 [in Ukrainian].

Derzhavnyi reiestr sortiv roslyn, prydatnykh dlia poshyrennia v Ukraini [State register of plant varieties suitable for distribution in Ukraine] [Electronic resource] URL: https://minagro.gov.ua/file-storage/reyestr-sortiv-roslin (access date 23.10.2024) [in Ukrainian].

DSTU 2240 – 93 Nasinnia silskohospodarskykh kultur. Sortovi ta posivni yakosti. Tekhnichni umovy [Seeds of agricultural crops. Varietal and sowing qualities. Technical conditions] [in Ukrainian].

DSTU 4138-2002. Nasinnia silskohospodarskykh kultur. Metody vyznachennia yakosti (2003) [Seeds of agricultural crops. Methods of determining quality] K. : Derzhspozhyvstandart Ukrainy [State consumer standard of Ukraine] [in Ukrainian].

DSTU 4794:2007 «Kvasolia. Tekhnolohiia vyroshchuvannia. Zahalni vymohy» [Bean. Cultivation technology. General requirements] [in Ukrainian].

DSTU ЕЭК OON FFV-06:2007 Kvasolia. Nastanovy shchodo postachannia i kontroliuvannia yakosti [DSTU UNECE FFV-06:2007 Beans. Guidelines for supply and quality control] [in Ukrainian].

DSTU 7160:2020 Nasinnia ovochevykh, bashtannykh, kormovykh i priano-aromatnykh kultur. Sortovi ta posivni yakosti. Tekhnichni umovy [Seeds of vegetable, melon, fodder and aromatic crops. Varietal and sowing qualities. Technical conditions] [in Ukrainian].

DSTU 8779:2018 Ovochevi kultury. Metody vyznachennia urazhennia khvorobamy [DSTU 8779:2018 Vegetable crops. Methods of determining disease damage] [in Ukrainian].

Ermantraut, E.R., Prysiazhniuk, O.I., & Shevchenko, I.L. (2007). Statystychnyi analiz ahronomichnykh doslidnykh danykh v paketi Statistica – 6 [Statistical analysis of agronomic experimental data in the package Statistica – 6]. Metodychni vkazivky. Kyiv : PolihrafKonsaltynh [in Ukrainian].

Inokulianty Ryzoaktyv Bobovi (BioNorma) [Inoculants Rhizoactive Legumes (BioNorma)] [Electronic resource] URL: https://superagronom.com/pesticidi-regulyatori-rostu/rizoaktiv-bobovi-id9570 (access date 23.10.2024) [in Ukrainian].

Krutylo, D.V., & Danyliuk, V.H. (2008). Reaktsiia sortiv kvasoli na inokuliatsiiu Rhizobium phaseoli za naiavnosti v grunti chyslennoi populiatsii ryzobii [Reaction of bean varieties to inoculation of Rhizobium phaseoli in the presence of a large population of rhizobia in the soil] *Kormy i kormovyrobnytstvo: mizhvidomomchyi tematychnyi naukovyi zbirnyk [Fodder and fodder production: interdepartmental thematic scientific collection],* 61, 78–83 [in Ukrainian].

Mazur, O.V. (2012). Vyvchennia zviazku tryvalosti vehetatsiinoho periodu z urozhainistiu sortiv roslyn soi [Study of the relationship between the duration of the growing season and the productivity of soybean plant varieties] *Zbirnyk naukovykh prats Vinnytskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu [Collection of scientific works of the Vinnytsia National Agrarian University],* 10 (50), 100–105 [in Ukrainian]

Petrychenko, V.F., Buhaiov, V.D., & Antoniv, S.F. (2005). Tekhnolohii vyroshchuvannia bobovykh ta zlakovykh trav na nasinnia [Technologies for growing leguminous and cereal grasses for seeds]. Vinnytsia, 52 [in Ukrainian].

Pozniak, O.V. (2014) *Phaseolus lunatus L.* – Perspektyvnyi dlia vyroshchuvannia v ukraini vyd bobovykh. [*Phaseolus lunatus L.* – A promising type of legume for cultivation in Ukraine]. 111–122. [Electronic resource] URL: http://www.dsmayak.com.ua/files/agrarna-nauka-2020.pdf#page=111 (access date 23.10.2024) [in Ukrainian].

Polianska, L., Chalyi, O., Hutorova, O., & Svyrydov, O. (2008) Kvasolia v suchasnykh umovakh hospodariuvannia [Beans in modern farming conditions] [[Electronic resource] URL: https://propozitsiya.com/ua/kvasolya-v-suchasnih-umovah-gospodaryuvannya (access date 23.10.2024) [in Ukrainian].

Rozhkov, A.O., Puzik, V.K., Kalenska, S.M., Puzik, L.M., Popov, S.I., Muzafarov, N.M., Bukhalo, V Ya., & Kryshtop, E.A. (2016). Doslidna sprava v ahronomii: navch. posibnyk: u 2 kn. – Kn. 1. *Teoretychni aspekty doslidnoi spravy [Research case in agronomy: education manual: in 2 books – Kn. 1. Theoretical aspects of the research case]* [in Ukrainian].

Rudenko, A.Yu., & Kundenko, M.P. (2020). Analiz suchasnykh metodiv peredposivnoi obrobky zernovykh kultur [Analysis of modern methods of pre-sowing processing of grain crops]. *Materialy XXI Mizhnarodnoi naukovoi konferentsii „Suchasni problemy zemlerobskoi mekhaniky" [Materials of the XXI International Scientific Conference «Modern Problems of Agricultural Mechanics»]* [Electronic resource] URL: http://surl.li/ichifi (access date 23.10.2024) [in Ukrainian].

Tymoshenko, I.I., Maishchuk, Z.M., & Kosylovych, H.O. (2004). Osnovy naukovykh doslidzhen v ahronomii [Basics of scientific research in agronomy]. Navch. Posibnyk [in Ukrainian].

Tymoshenko, S.P., & Vechera, O.M. (2010). Protruiuvannia nasinnia—stan, problemy i dosiahnennia [Seed etching—state, problems and achievements]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva* [*Mechanization and electrification of agriculture],* (94), 196–206 [in Ukrainian].

Trush, O.K., Bobro, M.A., & Rozhkov, A.O. (2018). Vplyv peredposivnoi obrobky bakterialnymy preparatamy nasinnia kvasoli na osnovni elementy struktury vrozhaiu [The effect of pre-sowing treatment of bean seeds with bacterial preparations on the main elements of the crop structure]. *Selektsiia i nasinnytstvo [Breeding and seed production]* 114, 120–127 [in Ukrainian].

Ushkarenko, V.O., Lavrenko, S.O., & Maksymov, D.O. (2017). Urozhainist ta yakist zerna kvasoli zalezhno vid obrobitku gruntu, mineralnykh dobryv ta shyryny mizhriaddia pry zroshenni [The yield and quality of bean grain depending on tillage, mineral fertilizers and the width of the row spacing during irrigation]. *Nauka v Pivdennomu rehioni Ukrainy. Vazhlyvi dosiahnennia naukovykh ustanov Pivdennoho rehionu Ukrainy v haluzi fundamentalnykh, prykladnykh doslidzhen ta innovatsiinoi diialnosti: naukove vydannia [Science in the Southern region of Ukraine. Important achievements of*

scientific institutions of the Southern region of Ukraine in the field of fundamental, applied research and innovative activity: scientific publication] [in Ukrainian].

Tsybrii-Sivak, N.V., & Bakhmat, M.I. (2021). Nedoliky, yaki trapliaiutsia pry zberihanni kvasoli [Disadvantages that occur when storing beans]. *IV Vseukrainska naukova internet-konferentsiia Innovatsiini tekhnolohii v roslynnytstvi [IV All-Ukrainian scientific internet conference Innovative technologies in crop production],* 155 – 156. [Electronic resource] URL: http://188.190.43.194:7980/jspui/bitstream/123456789/10489/1/155-156.pdf (access date 23.10.2024) [in Ukrainian].

Chynchyk, O.S., Olifirovych, S.I., & Olifirovych, V.O. (2021). Tryvalist vehetatsii ta produktyvnist sortiv kvasoli zvychainoi v umovakh Pivdennoi chastyny Lisostepu zakhidnoho [Vegetation duration and productivity of common bean varieties in the conditions of the Southern part of the Western Forest Steppe]. *Ahrobiolohiia [Agrobiology],* 1, 166–172 [in Ukrainian].

Chornolata, L., Pohorila, L., Pyryn, N., & Zdor, L. (2022). Yakisnyi nasinnievyi material zaporuka khoroshoho vrozhaiu [High-quality seed material is the key to a good harvest]. *Materialy XIV Mizhnarodnoi naukovoi konferentsii «Kormy i kormovyi bilok» (12 zhovtnia 2022 roku). Instytut kormiv ta silskoho hospodarstva Podillia NAAN [Materials of the XIV International scientific conference «Forage and fodder protein». Institute of Fodder and Agriculture of Podillia National Academy of Sciences],* 150–153 [in Ukrainian].

Shovkova, O.V., & Korotych, Ye.V. (2021). Efektyvnist mikrodobryv dlia peredposivnoi obrobky nasinnia soi [Effectiveness of microfertilizers for pre-sowing treatment of soybean seeds]. *Scientific Progress & Innovations,* 4, 98–102. https://doi.org/10.31210/visnyk2021.04.12 [in Ukrainian].

Shuvar, A.M., Sviderko, M.S., Behen, L.L., & Tereshko, R.V. (2014). Urozhai i yakist zerna kvasoli zalezhno vid zastosuvannia biolohichnykh preparativ [Yield and quality of bean grain depending on the use of biological preparations]. *Peredhirne ta hirske zemlerobstvo i tvarynnytstvo [Foothill and mountain agriculture and animal husbandry],* 56, 183–190 [in Ukrainian].

Отримано: 28.10.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

УДК 633.11:577.11
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.16

СЕЛЕКЦІЙНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ГЕНА GPC-B1 В ПОТРІЙНИХ СХРЕЩУВАННЯХ ТА ЗАЛУЧЕННЯ ГЕНІВ ВІД *AEGILOPS TAUSCHII* В СКЛАДНИХ СХРЕЩУВАННЯХ ІЗ МІСЦЕВИМИ СОРТАМИ

Я. С. Фанін[1], М. А. Литвиненко[2], О. О. Молодченкова[3], І. А. Міщенко[4], І. І. Моцний[5], А. А. Дуніч[6], Л. Т. Міщенко[7]

У статті розглядаються питання селекції м'якої озимої пшениці з використанням генетичних матеріалів, що містять ген GPC-B1, а також генів від Aegilops tauschii. Однією з актуальних проблем сучасної селекції є створення сортів пшениці з високим вмістом білка, підвищеною врожайністю та покращеними хлібопекарськими властивостями. Використання генетичної різноманітності дозволяє ефективно підвищувати якість зерна і створювати більш стійкі до біотичних і абіотичних факторів навколишнього середовища сорти.
Польові дослідження проводилися на базі Селекційно-генетичного інституту. Об'єктом досліджень були лінії пшениці, створені шляхом потрійних схрещувань з використанням ліній-носіїв гена GPC-B1 та генів від Aegilops tauschii. Вміст білка в зерні визначали методом К'єльдаля

[1] доктор філософії,
науковий співробітник лабораторії біохімії рослин
(Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннєзнавства та сортовивчення Національної академії аграрних наук України, м. Одеса)
e-mail: yaroslavfanin96@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3129-7583
[2] доктор сільськогосподарських наук, академік НААН, професор,
завідувач відділу селекції й насінництва пшениці
(Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннєзнавства та сортовивчення Національної академії аграрних наук України, м. Одеса)
e-mail: dr_litvin@ukr.net.
ORCID: 0000-0002-8605-6587
[3] доктор біологічних наук, старший науковий співробітник,
завідувачка лабораторії біохімії рослин
(Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннєзнавства та сортовивчення Національної академії аграрних наук України, м. Одеса)
e-mail: olgamolod@ukr.net
ORCID: 0000-0003-2511-0866
[4] кандидат економічних наук,
доцент кафедри адміністративного менеджменту та зовнішньоекономічної діяльності
(Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ)
e-mail: iamishchenko@ukr.net
ORCID: 0000-0003-0697-6971

та інфрачервоної спектроскопії. Фізико-хімічні показники зерна досліджували за допомогою методу седиментації.
Досліджено 3200 ліній, з яких 216 ліній мали підвищений вміст білка порівняно зі стандартними сортами. Найбільш перспективними виявилися лінії, що перевищували стандартні за вмістом білка на 10–15%, мали кращі фізико-хімічні показники, включаючи показники седиментації та хлібопекарські властивості. З використанням генів GPC-B1 і генів від Aegilops tauschii вдалося отримати стабільні генотипи, що поєднують підвищену врожайність з високою якістю зерна. Вперше проведено комплексне дослідження використання генів GPC-B1 та Aegilops tauschii у селекції м'якої пшениці. Результати можуть бути використані для створення нових сортів з підвищеним вмістом білка та покращеними хлібопекарськими властивостями, що має важливе значення для продовольчої безпеки та аграрного сектору.

Ключові слова: *пшениця м'яка озима, генетична різноманітність, білок, селекція, врожайність.*

BREEDING ASPECTS OF THE USE OF GPC-B1 GENE IN TRIPLE CROSSES WITH AND INVOLVEMENT OF GENES FROM *AEGILOPS TAUSCHII* IN COMPLEX CROSSES WITH LOCAL VARIETIES

Ya. S. Fanin, M. A. Lytvynenko, O. O. Molodchenkova, I. A. Mishchenko, I. I. Motsnyi, A. A. Dunich, L. T. Mishchenko

The article discusses the selection of soft winter wheat using genetic materials containing the GPC-B1 gene and genes from Aegilops tauschii. One of the current issues in modern breeding is the development of wheat varieties with high protein content, increased yield, and improved baking properties. Utilizing genetic diversity effectively enhances grain quality and creates more resilient varieties to biotic and abiotic environmental factors.
The field research was conducted at the Breeding and Genetic Institute. The study objects were wheat lines created through triple crosses using lines carrying the GPC-B1 gene and genes from Aegilops tauschii. The protein content in the grain was determined using the Kjeldahl method and infrared spectroscopy. The physicochemical properties of the grain were examined using the sedimentation method.
3200 lines were studied, of which 216 lines showed an increased protein content compared to standard varieties. The most promising lines exceeded the standard protein content by 10–15%, with better physicochemical properties, including sedimentation and baking properties. The use of GPC-B1 and Aegilops tauschii genes resulted in stable genotypes that combine high yield with superior grain quality. For the first time, a comprehensive study was conducted on the use of GPC-B1 and Aegilops tauschii genes in soft wheat breeding. The results can be used to develop new varieties with increased protein content and improved baking properties, which is essential for food security and the agricultural sector.

Key words: *soft winter wheat, genetic diversity, protein, breeding, yield.*

[5] кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник відділу загальної та молекулярної генетики
(Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннєзнавства та сортовивчення Національної академії аграрних наук України, м. Одеса)
e-mail: motsnyyii@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1812-9481
[6] кандидат біологічних наук, асистент кафедри вірусології
(ННЦ «Інститут біології та медицини»,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ)
e-mail: alinadunich@knu.ua
[7] доктор біологічних наук, професор
(Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ)
e-mail: lmishchenko@ukr.net
ORCID: 0000-0003-0697-6971

Вступ

Для досягнення якісного стрибка в селекції на високу продуктивність і якість зерна пшениці необхідно створювати нові сорти рослин, які б об'єднували в одному генотипі такі ознаки, як висока продуктивність, якість зерна різних напрямів використання з комплексною стійкістю до хвороб і шкідників, а також наявністю важливих мінералів і вітамінів. Результативність селекції на якість багато в чому залежить від наявності генетичного матеріалу, який сконцентрований у світових колекціях генофонду (Шелепов та ін., 2013). Найбільш інтенсивні дослідження якості зерна припадають на 60–80 роки XX ст., які спрямовувались переважно на пошук високобілкових генотипів у диких видах, таких як *Triticum L.* і *Aegilops* L. (Скалецька та ін., 2006).

Найбільш результативна робота велась в цей час у США та Канаді, де при дослідженнях, результатом експериментів вдалось збільшити кількість білка в зерні на 0,5–3,0% (Забарна, 2013). Було доведено, що рівень білка в зерні має полігенний характер (Малахова, 2013). На сьогодні у всіх хромосомах пшениці знайдені головні та мінорні локуси, які впливають на цей показник (Бурлака і Сорочинський, 2010).

Відомо, що старіння – це запрограмована деградація компонентів клітини, що робить доступними поживні речовини для ремобілізації в насіння. Можливо, ген *GPC-B1* бере участь у контролі цього процесу і володіє широким плейотропним ефектом (Distelfeld et al., 2004). У зерні рекомбінантних інбредних ліній, що несуть алелі від DIC, порівняно з лініями, що містять алелі від LDN, була виявлена вища концентрація не тільки білка (у середньому на 38%), а й цинку (12%), заліза (18%) та марганцю (29%). З використанням сучасних технологій секвенування (*Roche* 454 *pyrosequencing ma Illumina systems*) Д. Канту з колегами на 12-й день після цвітіння провели транскрипційний аналіз прапорцевого листка у трансгенних ліній сорту Bobwhite у порівнянні з не трансгенним контролем, і показали, що процес старіння рослин пшениці пов'язаний із змінами в експресії кількох сотень генів. Серед них були гени-транспортери, гени, які беруть участь у фотосинтезі, що регулює метаболічні процеси та відповідні реакції на стресори та ін. Різницю за рівнем їхньої експресії виявляли задовго до появи візуальних симптомів старіння. Таким чином, проведені у світі дослідження показали, що дія генів *GPC*, які впливають на вміст білка в зерні, проявляється після цвітіння, на ранньому етапі старіння рослини, і пов'язане з ремобілізацією поживних речовин з вегетативних органів рослини у зерно в процесі його наливу (Cantu et al., 2011).

У Канаді за допомогою створення дигаплоїдів і використання маркер-контрольованого відбору отримано три комерційні сорти ярої м'якої пшениці. Два з них, сорти Lillian та Somerset (Fox et al., 2005), відносяться до екстрасильних класу канадських західних ярих червонозерних сортів, а Burnside – до канадських західних надсильних сортів. Створені сорти перевищували, або не відрізнялися за врожайністю від сортів, у яких не був маркер гена *GPC-B1*, але всі вони мали вищий вміст білка в зерні (від 13,4 до 16,1%) і дозрівали на два–три дні раніше. Сорт Lillian також містив блок зчеплених генів *Lr34/Yr18* (хромосома 7D) стійкості до бурої та жовтої іржі, мав наповнене стебло і був стійким до пшеничного стеблового пильщика *Cephus cinctus Nort.*, поширеного у Північній Америці.

Останнім часом для створення нового селекційного матеріалу пшениці використовується генетичне різноманіття дикого виду *Aegilops* L. (DD, 2n = 2x = 14), який є донором ключового геному D культурної гексаплоїдної пшениці *T. aestivum* L. і визначає основні агрономічні ознаки пшениці, такі як врожайність, якість, стійкість до фітопатогенів та екстремальних факторів навколишнього середовища, включаючи посуху. Генетична мінливість *Aegilops* L. незрівнянно (у кілька тисяч разів) перевищує генетичну різноманітність сортів пшениці. На основі багатьох досліджень, A. tauschii найкраще підходить для покращення якості зерна в роді *Aegilops* L. Найефективнішим способом введення генетичної плазми A. tauschii в культуру є використання штучно створених гексаплоїдних синтетиків з геномною формулою AABBDD (2n = 6x = 42) у схрещуваннях з культурною пшеницею, де геноми A і B – від твердої пшениці або диких дводольних рослин, а ген D – від ехілопса *A. tauschii.* Доведено, що гексаплоїдна синтетика є потужним джерелом покращення культурної пшениці за низкою агрономічних ознак, таких як зернова продуктивність, стійкість до біотичних та абіотичних факторів, і майже єдиним джерелом покращення культурної пшениці за такою стратегічно важливою ознакою, як стійкість до посухи

(Cox et al., 2017). Крім того, основний донор геному D, пшениця *A. cylindrica* (CCDD, 2n = 4x = 28), також використовується в схрещуваннях з культурною пшеницею.

Так, від гібридів *A. geniculate, A. crassa, A. triuncialis* з сортами м'якої пшениці отримані лінії, які містять більше білка в зерні, у порівнянні з пшеницею – на 3–4%, а у гібридів *A. geniculate* x Безоста 1 – на 7%. Вміст гліадинів у зерні цих гібридів зменшився, тоді як вміст глютенінів збільшився, що свідчіть про поліпшення хлібопекарських властивостей. Більшість гібридів характеризуються кращими фізико-хімічними й технологічними якостями в порівнянні з пшеницею. Лінії, отримані від *A. geniculate*, мали кращі показники седиментації, якості клейковини і маси 1000 зерен (Діденко та ін., 2017). Були створені гібриди дісомно-доповнені та замішені від *A. speltosdes* та лінії м'якої пшениці з високим вмістом білка 18–19%, високим вмістом клейковини та рівнем седиментації (Моцний та ін., 2021).

У Селекційно-генетичному інституті – Національному центрі насіннєзнавства та сортовивчення (СГІ-НЦНС) також займаються створенням та дослідженням інтрогресивних ліній на базі *A. tauschii.* Великий об'єм роботи в цьому напрямку проведено співробітником відділу загальної та молекулярної генетики к.б.н. Іваном Івановичем Моцним. Серед генетичного матеріалу, одержаного у його дослідженнях, є інтрогресивні лінії з високою стійкістю до хвороб, підвищеною врожайністю та масою 1000 зерен, але головним чином – це підвищений вміст білка в зерні та поліпшені його хлібопекарські властивості (Моцний та ін., 2022).

Метою досліджень представлених у статті, було встановити ефективність добору за вмістом білка в зерні у рекомбінантних лініях, створених від схрещувань з донорськими лініями – носіями гена GPC-B1 та генів від A. tauschii та показати можливість комбінування в одному генотипі ознак з високими показниками вмісту білка в зерні, врожайності та хлібопекарських властивостей.

Матеріал та методи

Польові дослідження проводилися по чорному пару на дослідній ділянці відділу селекції та насінництва пшениці Селекційно-генетичного інституту – Національного центру насіннєзнавства і сортовивчення.

Селекційні лінії та сорти, що було використано у схрещування; 1) сорти м'якої озимої пшениці, що використовуються як батьківські компоненти у схрещуваннях – Куяльник, Нива, Оранта, Кантата, Оптима, Наснага, Ветеран, Мелодія, Мудрість, створені в СГІ-НЦНС, м. Одеса; 2) нові інтрогресивні лінії, створені методом віддаленої гібридизації у відділі загальної та молекулярної генетики та у відділі генетичних основ селекції СГІ-НЦНС: Матеріалом для вивчення гена *GPC-B1* слугували лінії F6 – F7, отримані від схрещування сорту *T. aestivum* Куяльник з лінією-донором гена *GPC-B1 T. turgidum ssp. dicoccoides*, надані для дослідження д.б.н. О. І. Рибалкою; матеріалом для вивчення впливу білковозбагачених генів A. tauschii слугували лінії отримані від насичених схрещувань адаптованих сортів пшениці Одеська 267, Куяльник, Зміна, Ватажок, Віжен, Альбатрос ff, Селенка. З мексиканськими елітними синтетиками (амфіплоїдами *T. durum Desf./Aegilops tauschii Coss.*) подальші ступінчасті схрещування отриманих гібридів з сучасними сортами та 4–6 самозапиленнями, проведені к.с.-г.н. І.І. Моцним.

Дослідження рекомбінантних ліній від схрещувань місцевих сортів з лініями – донорами. Закладався дослід за схемою традиційного селекційного процесу. Насіння рослин виділені при індивідуальному доборі, із гібридних популяцій F 2 за морфологічними характеристиками. Ці лінії слугували вихідним матеріалом для закладки ліній F 3, які були початковим об'єктом даних досліджень в селекційному розсаднику при ширині міжряддя 45 см, довжині рядка 2,5 м без повторень. Через кожні 20 ліній були розміщені сорт – стандарт Куяльник та батьківські компоненти. Наступний етап досліджень – попереднє сортовипробування (ширина міжряддя 30 см, довжина ділянки 6,8 м). Далі – сортовипробування (ширина міжряддя 15 см, довжина ділянки 6,8 м) з додаванням двох варіантів доз добрив N 60 й N 120. Був закладений дослід конкурсного сортовипробування з двома варіантами внесення добрив як і попереднього року. Спосіб посіву також був у двох варіантах: суцільний (ширина міжряддя 15 см), розріджений з міжряддям 30 см). Попереднє сортовипробування, сортовипробування та конкурсне сортовипробування проводилися в 3-кратній повторності.

Загальний вміст білка/азоту визначали методом К'єльдаля на автоматичному аналізаторі Kjeltec Auto 1030 ("FOSS") (ДСТУ 3768–2010. 2010). Загальний вміст білка

та фізичні властивості твердості вимірювали за допомогою методу інфрачервоної спектроскопії (NIR) (Наконечний і Жиляков, 2017). Рівень седиментації визначався методом із попереднім автолізом, зокрема, методом SDS-30 (Рибалка та ін., 2006).

Для виявлення вірусів було здійснено візуальне обстеження посівів. Відібрані проби були проаналізовані в біологічних тестах за допомогою рослин-індикаторів. Для візуалізації віріонів використовували трансмісійну електронну мікроскопію. Серологічні дослідження проводили за допомогою імуноферментного аналізу з власними та комерційними тест-системами згідно з рекомендаціями виробника. Результати реєстрували на автоматичному ІФА-аналізаторі Termo Labsystems Opsis MR (США) із програмним забезпеченням Dynex Revelation Quicklink при довжинах хвиль 405/630 нм. Для виділення тотальної РНК зі зразків були використані кіти Thermo Fisher, Qiagen (Великобританія). Для детекції вірусів методом ЗТ-ПЛР застосовували кіт для two-step-RT-PCR (Thermo Fisher).

Дані опрацьовували за допомогою дисперсійного аналізу за допомогою програмного забезпечення Statistica (StatSoft Inc.). Для порівняння середніх значень ($\bar{X}$) використовували найменшу істотну різницю ($НІР_{0,05}$) і рівень статистичної значущості (p). Визначені нами або взяті з літератури показники наводяться в таблицях і тексті з уніфікованими позначеннями їхньої вірогідності: *, ** і *** – вірогідні при $p < 0,05$, 0,01 і 0,001 рівні значущості, відповідно.

Результати та їх обговорення

Робота проводилась на залученні в місцевий генофонд генів від *A. tauschii* через складні схрещування та залучення гена *GPC-B1* потрійним схрещуванням з метою досягнути кумулятивного ефекту. Таким чином проводився добір з селекційного розсадника із 13 гібридних комбінації, до яких входили рекомбінантні лінії F3, створені від потрійних схрещувань з лініями з геном *GPC-B1* (6 гібридних комбінацій) і лініями-донорами генів високої білковості від *A. tauschii* (7 гібридних комбінацій). Добір рекомбінантних ліній проводився як за морфологічними ознаками, за вмістом білка та і за проявом до вірусних захворювань. З 3200 ліній було відібрано за однорідністю морфологічних ознак 672 лінії, що складає 21% від загальної кількості закладених у селекційному розсаднику. Цей відбір було проаналізовано за вмістом білка. За результатами аналізу було виявлено 216 ліній, 32,1% від загальної кількості ліній, що перевищували за вмістом білка сорт-стандарт Куяльник. З них 108 ліній, 16% від загальної кількості відібраних ліній, перевищували батьківські компоненти за цією ознакою. Серед ліній з більшим вмістом білка, ніж у батьківських компонентів, 49 шт. були створені на базі потрійних схрещувань з лініями-носіями *GPC-B1* і 59 шт. на базі схрещувань з лініями-носіями генів від *A. tauschii* (табл. 1).

Для продовження досліджень наступного року був закладений дослід із ліній F4 (ПСВ), які були представлені в кількості 216 ліній із 13 гібридних комбінацій (табл. 2). Дослідні лінії, як і в попередньому досліді в F4 (ПСВ), відбирались за вмістом білка, врожайністю, рівнем седиментації та стійкістю до вірусних хвороб. Але головним фактором добору залишався вміст білка в зерні. В результаті проведених досліджень було виділено 104 лінії, що складає 48,1% від загальної закладених ліній в досліді, з яких 67 ліній, що відповідає 31%, мали вміст білка в зерні на рівні сорту-стандарту та 37 ліній, що складає 17,1%, мали вміст білка більший, ніж батьківські компоненти. Порівнюючи лінії з підвищеним вмістом білка і лінії, які мали білковість зерна на рівні із стандартом, встановили, що різниця між ними складала 1,1%, що відповідає 9%.

Лінії з вмістом білка на рівні сорту-стандарту мали врожайність на 0,28 т/га вищу, що відповідає 6,4% (табл. 3). Більш суттєва різниця була за рівнем седиментації – на 13,9 мл, що відповідає 25,4%. Також рівень седиментації, як і в попередньому досліді, мав більш значну диференціацію між гібридними комбінаціями. Так, середній рівень седиментації з-поміж ліній, створених за потрійними схрещуваннями, склав 60 і 72,5 мл для ліній з вмістом білка на рівні стандарту і високобілкових ліній відповідно (табл. 4). Показники рівня седиментації у рекомбінантних лініях, створених від *A. tauschii*, мали результати на рівні 51,5–65,4 мл (для ліній з вмістом білка на рівні сорту-стандарту і високобілкових ліній відповідно).

Ця тенденція спостерігалася і за врожайністю ліній, створених на базі потрійних схрещувань: лінії з геном GPC-B1 мали в середньому рівень врожайності 5,52 т/га для стандартних і 5,10 т/га для високобілкових ліній. У ліній з генами високої білковості від *A. tauschii* цей показник складав 5,13 і 4,72 т/га відповідно для стандарт-

Таблиця 1

Результати добору рекомбінантних ліній F3 від потрійних схрещувань лінії з геном *GPC-B1* і лініями донорами генів високої білковості від *A. tauschii*

Гібридна комбінація	*	**Відібрані лінії**				**Межі мінливості вмісту білка в зерні %**		
		Стандартні		**Високобілкові**				
		*	%	*	%	**max**	**min**	**$\bar{X}$**
(13/11 *GPC-B1* х Оптима) х Мелодія	60	19	31,6	8	13,3	14,3	11,4	12,9
(13/11 *GPC-B1* х Оптима) х Наснага	62	22	35,4	11	17,7	14,2	10,9	12,6
(13/11 *GPC-B1* х Оптима) х Ветеран	34	10	29,4	5	14,7	14,6	10,8	12,7
(13/11 *GPC-B1* х Оптима) х Мудрість	52	17	32,6	8	15,3	13,1	10,8	12,0
(12/61 *GPC-B1* х Оптима) Мелодія	41	14	34,1	7	17,0	13,7	10,7	12,2
(12/61 *GPC-B1* Оптима) х Мудрість	60	19	31,6	10	16,6	14,9	11,8	13,4
$\bar{X}$, **Σ**	309	101	32,5	49	15,8	14,1	11,1	12,6
(336ф х 16В241) х 09/ Е212	42	16	38,0	8	19,0	13,5	11,7	12,6
(Зміна х Е175_09) х F4Мудрість	47	15	31,9	8	17,0	15,9	12,1	14,0
Куяльник х (1161/16 х 1102/16)	54	16	29,6	9	16,6	17,1	13,2	15,2
Е234/09 х Мудрість F2	61	19	31,1	8	13,1	13,6	10,6	12,1
Е234/09 х Ера F2	61	19	31,1	8	13,1	13,6	10,6	12,1
(2418/14 х Селянка) х (ES25 х Ватажок)	55	14	25,4	8	14,5	14,9	10,4	12,7
(2419/14 х Селянка) х (ES25 х Подяка)	42	15	35,7	7	16,6	13,2	10,6	11,9
$\bar{X}$, Σ	362	114	31,8	56	15,7	14,3	11,3	12,8

«» – Кількість ліній, шт.*

Таблиця 2

Вміст білка в зерні рекомбінантних ліній (F4 ПСВ) від потрійних схрещувань лінії з геном *GPC-B1* і лініями донорами генів високої білковості від *A. tauschii*

Гібридна комбінація	**Кількість відібраних ліній, шт.**		**Білковість зерна, %**		**Різниця**	**CV,%**
	Стан-дартних	**Високо-білкових**	**Стан-дартних**	**Високо-білкових**		
1	2	3	4	5	6	7
(13/11 *GPC-B1* х Оптима) х Мелодія	6	3	11,3	12,4	+0,9	6,3
(13/11 *GPC-B1* х Оптима) х Наснага	6	3	11,2	12,9	+1,7	4,5
(13/11 *GPC-B1* х Оптима) х Ветеран	6	3	11,6	12,8	+1,2	5,6
(13/11 *GPC-B1* х Оптима) х Мудрість	5	3	12,4	13,3	+0,9	6,6
(12/61 *GPC-B1* х Оптима) Мелодія	3	3	12,2	13,1	+0,9	6,3
(12/61 *GPC-B1* Оптима) х Мудрість	5	2	12,1	13,4	+1,3	7,6
$\bar{X}$	Σ 31	Σ 17	11,80	12,98	+1,15	6,15

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5	6	7
(336ф х 16В241) х 09/ Е212	3	3	12,5	13,7	+1,2	6,1
(Зміна х Е175_09) х F4// Мудрість	3	3	12,9	14,1	+1.2	6,4
Куяльник х (1161/16 х 1102/16)	4	3	12,1	13,2	+1,2	4,6
Е234/09 х Мудрість F2	8	3	11,8	13,3	+1,5	8,2
Е234/09 х Ера F2	8	3	12,6	13,6	+1	5,4
(2418/14 х Селянка) х (ES25 х Ватажок)	4	3	12,9	13,4	+0,5	12,1
(2419/14 х Селянка) х (ES25 х Подяка)	5	3	13,2	14,0	+0,8	6,5
$\bar{X}$	Σ 33	Σ 21	12,6	13,6	1,0	7,0

Таблиця 3

Врожайність рекомбінантних ліній (F4 ПСВ) від потрійних схрещувань ліній з геном *GPC-B1* і лініями донорами генів високої білковості від *A. tauschii*

Гібридна комбінація	**Кількість відібраних ліній, шт.**		**Врожайність ліній, т/га, сер. зн.**		**Різниця**	**CV,%**
	Стан-дартних	**Високо-білкових**	**Стан-дартних**	**Високо-білкових**		
(13/11 *GPC-B1* х Оптима) х Мелодія	6	3	4,72	4,40	-0,32	5,3
(13/11 *GPC-B1* х Оптима) х Наснага	6	3	5,15	5,10	-0,05	5,6
(13/11 *GPC-B1* х Оптима) х Ветеран	6	3	5,39	4,95	-0,44	4,4
(13/11 *GPC-B1* х Оптима) х Мудрість	5	3	4,65	4,37	-0,28	5,2
(12/61 *GPC-B1* х Оптима) Мелодія	3	3	4,73	4,50	-0,23	5,4
(12/61 *GPC-B1* Оптима) х Мудрість	5	2	4,87	4,78	-0,09	6,5
$\bar{X}$	Σ 31	Σ 17	4,92	4,68	-0,24	5,4
(336ф х 16В241) х 09/Е212	3	3	4,70	4,65	-0,15	7,6
(Зміна х Е175_09) х F4//Мудрість	3	3	4,49	4,34	-0,15	7,3
Куяльник х (1161/16 х 1102/16)	4	3	4,35	4,29	-0,06	3,6
Е234/09 х Мудрість F2	8	3	4,53	4,30	-0,23	11,2
Е234/09 х Ера F2	8	3	4,39	4,04	-0,35	13,4
(2418/14 х Селянка) х (ES25 х Ватажок)	4	3	4,48	4,01	-0,47	22,1
(2419/14 х Селянка) х (ES25 х Подяка)	5	3	4,27	3,97	-0,30	13,5
$\bar{X}$	Σ 33	Σ 21	4,57	4,26	-0,2	11,2

Таблиця 4

Рівень седиментації в зерні рекомбінантних ліній (F4 ПСВ) від потрійних схрещувань ліній з геном *GPC-B1* і лініями донорами генів високої білковості від *A. Tauschii*

Гібридна комбінація	**Кількість відібраних ліній, шт.**		**Рівень седиментації, мл.**		**Різниця**	**CV,%**
	Стандартних	**Високобілкових**	**Стандартних**	**Високобілкових**		
(13/11 *GPC-B1* х Оптима) х Мелодія	6	3	56	72	+16	8,3
(13/11 *GPC-B1* х Оптима) х Наснага	6	3	59	74	+15	7,6
(13/11 *GPC-B1* х Оптима) х Ветеран	6	3	57	68	+11	6,4
(13/11 *GPC-B1* х Оптима) х Мудрість	5	3	61	75	+14	7,2
(12/61 *GPC-B1* х Оптима) Мелодія	3	3	62	75	+13	6,5
(12/61 *GPC-B1* Оптима) х Мудрість	5	2	64	71	+8	4,5
$\bar{X}$	Σ 31	Σ 17	59,8	72,5	+12,8	6,7
(336ф х 16В241) х 09/ Е212	3	3	54	67	+13	7,6
(Зміна х Е175/09) х F4Мудрість	3	3	57	69	+12	6,3
Куяльник х (1161/16 х 1102/16)	4	3	60	73	+13	7,5
Е234/09 х Мудрість F2	8	3	46	62	+12	6,2
Е234/09 х Ера F2	8	3	44	58	+14	7,4
(2418/14 х Селянка) х (ES25 х Ватажок)	4	3	48	64	+16	8,1
(2419/14 х Селянка) х (ES25 х Подяка)	5	3	52	65	+13	7,5
$\bar{X}$	Σ 33	Σ 21	51,6	65,4	13,3	7,2

них і високобілкових ліній. Протилежна закономірність спостерігалась за вмістом білка: лінії з геном GPC-B1, створені на базі потрійних схрещувань, дещо поступалися за середнім значенням вмісту білка як для стандартних ліній – 11,8 і 12,1%, так і для високобілкових ліній – 12,9 і 13,4% відповідно. За проявом вірусних захворювань два напрямки селекції не мали суттєвої різниці. Отже, порівнюючи два напрями підвищення вмісту білка, можна зробити висновок, що лінії з геном GPC-B1 перевищують лінії з генами високобілковості від *A. tauschii* за показником седиментації на 16,5%, за врожайністю на 8,2%, але поступаються за вмістом білка в зерні на 9,7%. Серед гібридних комбінацій з генами високобілковості від *A. tauschii* за вмістом білка можна відділити такі лінії, як (Зміна/ Е175_09 х F4//Мудрість) і ((2419/14 х Селянка) х (ES25 х Подяка)) з середнім вмістом білка в зерні у ліній в комбінаціях 14,1% і 14,0% відповідно. Серед гібридних популяцій, створених на базі ліній-донорів GPC-B1, можна виділити (12/61 GPC-B1 Оптима) х Мудрість і (13/11 GPC B1 х Оптима) х Мудрість з середнім вмістом білка в зерні у ліній в комбінаціях 13,4%.

З отриманих результатів добору рекомбінантних ліній з донорами гена *GPC-B1* та генів від *A. tauschii* (табл. 5) можна зробити висновок, що при доборі ліній з підвищеним вмістом білка необхідна перевірка у наступних поколіннях для виявлення стабільних за цією ознакою генотипів. В цьому переконує відсоток кількості ліній з високим вмістом білка в зерні на другий рік досліджень. Для рекомбінантних ліній, створених на базі схрещувань з лініями-носіями гена *GPC-B1*, відсоток ліній, які підтвердили свою високобілковість в середньому по гібридних комбінаціях, був на рівні 16,8%, тобто при-

близно тільки кожна шоста лінія. Для рекомбінантних ліній, створених від схрещувань з лініями носіями генів від *A. tauschii*, відсоток ліній хоча і був вищий – 18,8%, але це не мало принципового значення. Тому, для повного виявлення кількості та якості трансгресії, рекомбінантні лінії були досліджені і наступного року.

За отриманими результатами в групі гібридних комбінацій, створених від парних схрещувань, було виділено 27 лінії F5, які стабільно по роках мали підвищений вміст білка в порівнянні з сортом-стандартом та кращим батьківським компонентом (див. табл. 1). Це відповідає 5,0% від загальної кількості ліній (534 шт). Дослідження рекомбінантних ліній F5, створених від потрійних і складних схрещувань, які проводилися у 2022/23 вегетаційному році, дають можливість порівняти ефективність добору між дослідженими групами ліній (рис. 1).

За отриманими даними, серед гібридних комбінацій, створених від складних схрещувань з носіями генів *A. tauschii*, кількість високобілкових ліній від початкових показників у селекційному розсаднику (363 шт.) у конкурсному сортовипробуванні склала 12 шт., або 3,2% відповідно. По гібридних комбінаціях кількість високобілкових ліній не перевищувала 2-х шт. на комбінацію, відсоток таких ліній від початкової кількості був у межах 2,3–4,2%. Використання ліній-донорів гена *GPC-B1* в гібридизації

Таблиця 5

Ефективність добору у рекомбінантних ліній пшениці м'якої озимої, створених від схрещування місцевих сортів з донорами гена *GPC-B1* та генів від *A. tauschii* на різних етапах селекційного процесу, 2021–2022 рр.

Гібридна комбінація	**СР F3**					**ПСВ F 4**				
	****	*		**		*		**		***
		Шт.	**%**	**Шт.**	**%**	**Шт.**	**%**	**Шт.**	**%**	**%**
(13/11 *GPC-B1* х Оптима) х Мелодія	60	19	8	13,3	13,3	6	10,0	3	5,0	15,8
(13/11 *GPC-B1* х Оптима) х Наснага	62	22	11	17,7	17,7	6	9,7	3	4,8	13,6
(13/11 *GPC-B1* х Оптима) х Ветеран	34	10	5	14,7	14,7	6	17,6	3	8,8	30,0
(13/11 *GPC-B1* х Оптима) х Мудрість	52	17	8	15.3	15,3	5	9,6	3	5,8	17,6
(12/61 *GPC-B1* х Оптима) Мелодія	41	14	7	17,0	17	3	7,3	3	7,3	21,4
(12/61 *GPC-B1* Оптима) х Мудрість	60	19	10	16,7	16,6	5	8,3	2	3,3	10,5
$\bar{X}$	Σ 309	Σ 101	8,2	15,8	15,8	Σ 29	9,4	Σ 17	5,5	16,8
Е234/09 х Мудрість F2	62	20	11	17,7	19	8	12,9	3	4,8	15,0
Е234/09 х Ера F2	61	19	8	13,1	17	8	13,1	3	4,9	15,8
(2418/14 х Селянка) х (ES25 х Ватажок)	55	14	8	14,5	16,6	4	7,3	3	5,5	21,4
(2419/14 х Селянка) х (ES25 х Подяка)	42	15	7	16,6	13,1	4	9,5	3	7,1	20,0
(336ф х 16В241) х 09/Е212	42	16	8	19,0	13,1	3	7,1	3	7,1	18,8
(Зміна х Е175_09) х F4Мудрість	47	15	8	17,0	14,5	3	6,4	3	6,4	20,0
Куяльник х (1161/16 х 1102/16)	54	16	9	16,6	16,6	4	7,4	3	5,6	18,8
$\bar{X}$	Σ 362	Σ 114	8,4	16,4	15,7	Σ 34	9,4	Σ 21	5,8	18,4

Примітка: «» – Лінії з вмістом білка на рівні стандарту; «**» – Високобілкові лінії; «***» – Підтверджені високобілкові лінії; «****» – Кількість відібраних, шт.*

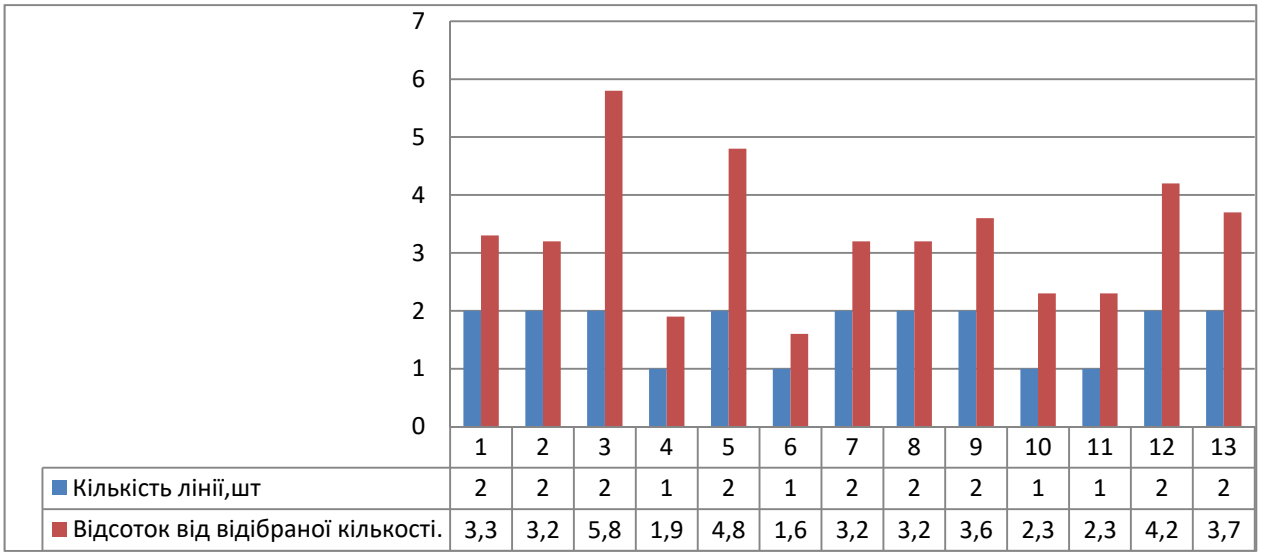


Рис. 1. Порівняння ефективності добору між дослідженими групами гібридних комбінацій

Примітка: 1 – 13/11 GPC-B1 х Оптима) х Мелодія; 2 – (13/11 GPC-B1 х Оптима) х Наснага; 3 – (13/11 GPC-B1 х Оптима) х Ветеран; 4 – (13/11 GPC-B1 х Оптима) х Мудрість; 5 – (12/61 GPC-B1 х Оптима) Мелодія; 6 – (12/61 GPC-B1 Оптима) х Мудрість; 7 – Е234/09 х Мудрість F2; 8 – Е234/09 х Ера F2; 9 – (2418/14 х Селянка) х (ES25 х Ватажок); 10 – (2419/14 х Селянка) х (ES25 х Подяка); 11 – 336ф/16В241 х 09/Е212; 12 – Зміна/Е175_09 х F4// Мудрість; 13 – Куяльник х (1161/16 х 1102/16).

з сортами екстрасильними за якістю зерна пшениці забезпечує стабільне проявлення високобілковості зерна у лініях в кількості 10 шт., або 3,4% відповідно. Як і в гібридних комбінаціях від складних схрещувань, кількість високобілкових ліній не перевищувала 2-х шт. на гібридну комбінацію. Відсоток таких ліній від початкової кількості був у межах 1,6–4,8% залежно від гібридної комбінації. Для прискорення ідентифікації таких ліній можливе використання різних екологічних груп чи різних агрофонів.

Отже, внаслідок аналізу і добору рекомбінантних ліній, починаючи з покоління F3, у F5 були отримані лінії у кількості 27 шт. (5,0%) від парних ліній схрещувань, 10 шт. (3,4%) від потрійних схрещувань, 12 шт. (3,2%) від складних схрещувань. Ці лінії по роках стабільно перевищували за вмістом білка сорт-стандарт Куяльник та кращого з батьківських компонентів. Такі лінії проходять подальше вивчення в конкурсних екологічних сортовипробуваннях та на різних агрофонах, як можливі кандидати для передання нового сорту до Державного сортовипробування.

Висновки

Для створення не тільки високобілкового вихідного матеріалу, а також і сортів, необхідно дотримуватися наступного алгоритму дій: 1. Визначення білка з використанням інфрачервоного аналізатора на первинних ланках селекції (F3) з подальшою перевіркою методом К'єльдаля. 2. Визначення рівня седиментації методом SDS-30 на первинних ланках селекції (F3-5) з подальшою перевіркою реологічних властивостей тіста на альвіографі (F4-5). 3. Ступень проявлення інфекції за морфологічними ознаками на первинних ланка та імуноферментний аналіз на пізніх ланках.

Внаслідок аналізу і добору рекомбінантних ліній, починаючи з покоління F3, в F5 були отримані високобілкові лінії в кількості 10 шт. (3,4%) від потрійних схрещувань, 12 шт. (3,2%) від складних схрещувань.

Подяки

Робота виконана за підтримки і фінансування проєкту НФДУ № 2023.03/0244 «Механізми стійкості економічно важливих культур до вірусних хвороб за умов воєнного стану і глобального потепління» конкурсу «Передова наука в Україні».

Список використаної літератури

Бурлака О.М., Сорочинський Б.В. Біофортифікація сільськогосподарських рослин. *Біотехнологія.* 2010. № 5. С. 31–42.

Діденко С.Ю., Реліна Л.І., Усова З.В., Вечерська Л.А., Богуславський Р.Л., Моцний І.І. Створення ліній пшениці озимої м'якої з залученням генетичної плазми Thinopyrum intermedium. *Генетичні ресурси рослин.* 2017. № 20. С. 21–31.

ДСТУ 3768–2010. Пшениця. Технічні умови. Держспоживстандарт України. 2010. С. 14.

Забарна Ю.В. Понятійно-категорійна сутність глобальної продовольчої безпеки. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Сер.: Економіка, аграрний менеджмент, бізнес.* 2013.

Малахова Л.В. Шляхи подолання прихованого голоду як складової глобальної продовольчої проблеми. *Вісник Харківського національного університету імені ВН Каразіна. Серія: Міжнародні відносини. Економіка. Країнознавство. Туризм.* 2013. № 1086. Вип. 2. С. 86–89.

Моцний І.І., Нарган Т.П., Наконечний М.Ю., Лифенко С.П., Молодченкова О.О., Міщенко Л.Т. Різноманіття похідних віддаленої гібридизації озимої пшениці за стійкістю до хвороб та іншими чужинними ознаками. *Вісник Одеського національного університету. Біологія.* 2021. № 26 (2). С. 51–72. https://doi.org/10.18524/2077-1746.2021.2(49).246884.

Моцний І.І., Молодченкова О.О., Нарган Т.П., Наконечний М.Ю., Лифенко С.П., Фанін Я.С., Міщенко Л.Т. Оцінка похідних віддаленої гібридизації пшениці за агрономічними ознаками в посушливих умовах півдня України. *Фактори експериментальної еволюції організмів.* 2022. № 31. С. 71–76. https://doi.org/10.7124/FEEO.v31.1487.

Наконечний О.А., Жиляков Д.В. Удосконалення методів контролю оптичних характеристик цільного зерна пшениці із застосуванням ближнього інфрачервоного спектру. *Технічна творчість. Зб. наук. праць Хмельницький.* ХНУ. 2017. № 6. С. 53–56.

Рибалка О.І., Червоніс М.В., Парфентьєв М.Г., Аксельруд Д.В. Пат. № 17023 Україна, (2006) A01H 1/04. Спосіб непрямої оцінки «сили» борошна – седиментація SDS-30. Селекційно-генетичний інститут. № u200610062; заявл. 06.02.2006; опубл. 15.09.2006; Бюл. № 9.

Основи наукових досліджень зі зберігання та переробки продукції рослинництва: навч. посіб. Скалецька Л.Ф., Подпрятов Г.І., Завадська О.В. Київ : НАУ, 2006. 204 с.

Пшениця: біологія, селекція, морфологія, насінництво. Шелепов В.В., Гаврилюк Н.Н., Вергунов В.А. К. : Логос, 2013. 498 с.

Cantu D., Pearce S.P., Distelfeld A., Christiansen M.W., Uauy C., Akhunov E., Fahima T., Dubcovsky J. Effect of the down-regulation of the high Grain Protein Content (GPC) genes on the wheat transcriptome during monocarpic senescence. *BMC Genomics.* 2011. № 12. P. 492–509. https://doi.org/10.1186/1471-2164-12-492.

Cox T., Wu J., Wang Sh., Cai J., Zhang Q., Fu B. Comparing two approaches for introgression of germplasm from Aegilops tauschii into common wheat. *The Crop Journal.* 2017. Vol 5. P. 355–362. https://doi.org/10.1016/j.cj.2017.05.006.

Distelfeld A., Uauy C., Olmos S., Schlatter A.R., Dubcovsky J., Fahima T. Microcolinearity between a 2-cM region encompassing the grain protein content locus Gpc-6B1 on wheat chromosome 6B and a 350-kb region on rice chromosome 2. *Funct. Integr. Genomics.* 2004. Vol. 4. P. 59–66. https://doi.org/10.1007/S10142-003-0097-3.

Fox S.L., Townley-Smith T.F., Humphreys D.G., Mc. Callum B.D., Fetch T.G., Gaudet D.A., Gilbert J.A., Menzies J.G., Noll J.S., Howes N.K. Somerset hard red spring wheat. 2005. [Електронний ресурс] URL: http://www.pgdc.ca/pdfs/wrt/ cultivardescriptions/Somerset.pdf. (дата звернення 10.10.2024).

Gorafi Y., Kim J.-S., Elbashir A., Tsujimoto H. A population of wheat synthetic derivatives: an effective platform to explore, harness and utilize genetic diversity of Aegilops tauschii for wheat improvement. *Theor. Appl. Genet.* 2018. Vol. 131. P. 1615–1625.

Ribarov Stefan R., Petyo G. Bochev. A chemiluminescent method for measurement of activated oxygen forms in biological fluids and homogenates. *Journal of Biochemical and Biophysical Methods.* 1983. Vol. 8.3. P. 205–212.

References

Burlaka, O.M., & Sorochynskyi, B.V. (2010). Biofortyfikatsiia silskohospodarskykh roslyn [Biofortification of agricultural plants]. *Biotekhnolohiia [Biotechnology]*, 5, 31–42 [in Ukrainian].

Didenko, S.Yu., Relina, L I., Usova, Z.V., Vecherzka, L.A., Bohuslavskyi, R.L., & Motsnyi, I.I. (2017). Stvorennia liniy pshenytsi ozymoi miahkoi z zaluchennia genetichnoi plazmy Thinopyrum intermedium [Creation of soft winter wheat lines involving genetic plasma Thinopyrum intermedium]. *Henetychni resursy roslyn [Plant Genetic Resources]*, 20, 21–31 [in Ukrainian].

DSTU 3768–2010. (2010). Pshenytsia. Tekhnichni umovy [Wheat. Technical specifications]. Derzhspozhivstandart Ukrainy [State Consumer Standard of Ukraine], 14 [in Ukrainian].

Zabarna, Yu.V. (2013). Poniatiino-katehoriina sutnist hlobalnoi prodovolchoi bezpeky [Conceptual and categorical essence of global food security]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu biorysursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Ser.: Ekonomika, ahrarnyi menedzhment, biznes [Scientific Bulletin of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine. Series: Economics, Agrarian Management, Business],* 181, 162–167 [in Ukrainian].

Malakhova, L.V. (2013). Shliakhy podolannia prykhovanoho holodu yak skladovoi hlobalnoi prodovolchoi problemy [Ways to overcome hidden hunger as part of the global food problem]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V. N. Karazina. Seriia: Mizhnarodni vidnosyny. Ekonomika. Krainoznavstvo. Turyzm [Bulletin of Kharkiv National University named after V. N. Karazin. Series: International Relations. Economics. Country Studies. Tourism],* 1086 (2), 86–89 [in Ukrainian].

Motsnyi, I.I., Nargan, T.P., Nakonechnyi, M.Yu., Lifenko, S.P., Molodchenkova, O.O., & Mishchenko, L.T. (2021). Riznomanittia pokhidnykh viddalenoi hibrydyzatsii ozymoi pshenytsi za stiikistiu do khvorob ta inshymy chuzhynnymy oznakamy [Diversity of derivatives of distant hybridization of winter wheat for resistance to diseases and other foreign traits]. *Visnyk Odeskoho natsionalnoho universytetu. Biolohiia [Bulletin of the Odessa National University. Biology]*, 26 (2), 51–72. https://doi.org/10.18524/2077-1746.2021.2(49).246884 [in Ukrainian].

Motsnyi, I.I., Molodchenkova, O.O., Nargan, T.P., Nakonechnyi, M.Yu., Lifenko, S.P., Fanin, Ya.S., & Mishchenko, L.T. (2022). Otsinka pokhidnykh viddalenoi hibrydyzatsii pshenytsi za ahronomichnymy oznakamy v posushlyvykh umovakh pivdnia Ukrainy [Evaluation of distant hybridization derivatives of wheat by agronomic traits in the arid conditions of southern Ukraine]. *Faktory eksperymentalnoi evoliutsii orhanizmiv [Factors of Experimental Evolution of Organisms]*, 31, 71–76. https://doi.org/10.7124/FEEO.v31.1487 [in Ukrainian].

Nakonechnyi, O.A., & Zhiliakov, D.V. (2017). Udoskonalennia metodiv kontroliu optychnykh kharakterystyk tsilnoho zerna pshenytsi iz zastosuvanniam blyzhnoho infrakrasnoho spektra [Improvement of methods for controlling the optical characteristics of whole wheat grain using the near-infrared spectrum]. *Tekhnichna tvorchist [Technical Creativity]*, 6, 53–56 [in Ukrainian].

Rybalko, O.I., Chervonis, M.V., Parfentieiev, M.H., & Akselrud, D.V. (2006). Pat. No 17023 Ukraina, A01N 1/04. Sposib nepriamoi otsinky «syly» boroshna – sedymentatsiia SDS-30 [Method for indirect assessment of flour «strength» – SDS-30 sedimentation]. Sotsiolohichno-henetichnyi instytut [Sociological and Genetic Institute], № u200610062, 15.09.2006, Byul. № 9 [in Ukrainian].

Skelecka, L.F., Podpriatov, H.I., & Zavadska, O.V. (2006). Osnovy naukovykh doslidzhen zi zberihannia ta pererobky produktsii roslynnytstva [Fundamentals of scientific research on storage and processing of crop production]. Kyiv: NAU [in Ukrainian].

Shelepov, V.V., Havryliuk, N.N., & Verhunov, V.A. (2013). Pshenytsia: biolohiia, selektsiia, morfolohiia, nasinniivnytstvo [Wheat: Biology, selection, morphology, seed production]. Kyiv: Logos, 498 p. [in Ukrainian].

Cantu, D., Pearce, S.P., Distelfeld, A., Christiansen, M.W., Uauy, C., Akhunov, E., Fahima, T., & Dubcovsky, J. (2011). Effect of the down-regulation of the high Grain Protein Content (GPC) genes on the wheat transcriptome during monocarpic senescence. *BMC Genomics*, 12, 492–509. https://doi.org/10.1186/1471-2164-12-492 [in English].

Cox, T., Wu, J., Wang, Sh., Cai, J., Zhang, Q., & Fu, B. (2017). Comparing two approaches for introgression of germplasm from *Aegilops tauschii* into common wheat. *The Crop Journal*, 5, 355–362. https://doi.org/10.1016/j.cj.2017.05.006 [in English].

Distelfeld, A., Uauy, C., Olmos, S., Schlatter, A.R., Dubcovsky, J., & Fahima, T. (2004). Microcolinearity between a 2-cM region encompassing the grain protein content locus *Gpc-6B1* on wheat chromosome 6B and a 350-kb region on rice chromosome 2. *Functional & Integrative Genomics*, 4, 59–66. https://doi.org/10.1007/S10142-003-0097-3 [in English].

Fox, S.L., Townley-Smith, T.F., Humphreys, D.G., McCallum, B.D., Fetch, T.G., Gaudet, D.A., Gilbert, J.A., Menzies, J.G., Noll, J.S., & Howes, N.K. (2005). Somerset hard red spring wheat.

[Electronic resource] URL: http://www.pgdc.ca/pdfs/wrt/cultivardescriptions/Somerset.pdf (access date 10.10.2024) [in English].

Gorafi, Y., Kim, J.-S., Elbashir, A., & Tsujimoto, H. (2018). A population of wheat synthetic derivatives: An effective platform to explore, harness and utilize genetic diversity of *Aegilops tauschii* for wheat improvement. Theoretical and Applied Genetics, 131, 1615–1625 [in English].

Ribarov, S.R., & Bochev, P.G. (1983). A chemiluminescent method for measurement of activated oxygen forms in biological fluids and homogenates. *Journal of Biochemical and Biophysical Methods*, 8(3), 205–212 [in English].

Отримано: 31.10.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

УДК 635.15:631.5
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.17

ҐРУНТОРЕАБІЛІТАЦІЙНИЙ ПОТЕНЦІАЛ РЕДЬКИ ОЛІЙНОЇ ЗА ЇЇ СИДЕРАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ З ПОЗИЦІЇ ВІДНОВЛЕННЯ БАЗОВИХ АГРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Я. Г. Цицюра[1]

Відмічено, що для України актуальним є застосування ґрунтореабілітаційних технологій з огляду на інтенсивність та сталість розвитку деградаційних процесів ґрунтового покриву, особливо у частині агрофізичної деградації, викликаної знеструктуренням ґрунту та його переущільненням, втратою корисної шпаруватості. Такі тенденції у підсумку є загрозою для збереження агроландшафтів та формування засад продовольчої безпеки.
За п'ятирічний період (2019–2024 рр.) проведено оцінку ефективності та доцільності застосування редьки олійної як сидеральної культури у варіанті літнього (проміжного) сидерального використання із сталим чотирьохрічним циклом з метою вивчення характеру впливу такого агротехнологічного рішення на формування базових агрофізичних показників ґрунту на тест-об'єкті сірих лісових ґрунтах із середнім рівнем початкової агрофізичної деградації.
За результатами досліджень визначено сприятливий гідротермічний режим територій Правобережного Лісостепу України зони сірих лісових ґрунтів для забезпечення процесів мінералізації сидеральної маси та формування позитивного результуючого впливу на базові агрофізичні показники ґрунту. Встановлено доцільність літнього варіанту сидерації за використання листостеблової маси редьки олійної з періодом не менше 4 років для підвищення частки агрономічно цінної фракції ґрунтових агрегатів щонайменше на 6,9% при зниженні частки брилистої фракції щонайменше на 3,2%, зниження щільності ґрунту на 6,9%, підвищення шпаруватості аерації на 7,3% за одночасного підвищення загальної шпаруватості на 10,0%.
Встановлено також результуючий позитивний вплив застосування редьки олійної як сидерату на загальну структурованість ґрунтових агрегатів на фоні істотного зниження частки агрегатів із брилистим абрисом та формування оптимальної дисперсної поверхні ґрунту при зростанні коефіцієнту структурності ґрунту в інтервалі 0,36–0,54.

Ключові слова: *агрофізична деградація ґрунту, щільність, шпаруватість, структурність ґрунту, сидерація.*

[1] кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри землеробства, ґрунтознавства та агрохімії
(Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця)
e-mail: yaroslavtsytsyura@ukr.net
ORCID: 0000-0002-9167-833X

SOIL REHABILITATION POTENTIAL OF OIL RADISH FOR ITS GREEN MANURE USE FROM THE POINT OF VIEW OF RESTORATION OF BASIC AGROPHYSICAL PROPERTIES

Ya. G. Tsytsiura

It is noted that the use of soil rehabilitation technologies is relevant for Ukraine, given the intensity and sustainability of the development of degradation processes of soil cover, especially in terms of agrophysical degradation caused by soil disintegration and overcompaction, loss of useful porosity. Such trends ultimately pose a threat to the preservation of agricultural landscapes and the formation of the foundations of food security.

Over a five-year period (2019–2024), the effectiveness and feasibility of using oilseed radish as a green manure crop in the variant of summer (intermediate) green manure use with a stable four-year cycle was assessed in order to study the nature of the impact of such an agrotechnological solution on the formation of basic agrophysical soil parameters on the test site of gray forest soils with an average level of initial agrophysical degradation.

According to the results of the research, a favorable hydrothermal regime of the territories of the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine of the gray forest soil zone was determined to ensure the processes of mineralization of green manure and the formation of a positive resulting effect on the basic agrophysical parameters of the soil. The expediency of the summer green manure variant using oilseed radish leaf and stem mass with a period of at least 4 years to increase the share of agronomically valuable fraction of soil aggregates by at least 6.9% while reducing the share of cloddy fraction by at least 3.2%, reducing soil density by 6.9%, increasing aeration porosity by 7.3%, while increasing the total porosity by 10.0% was established.

The resulting positive effect of the use of oil radish as a green manure on the overall structure of soil aggregates against the background of a significant decrease in the proportion of aggregates with a lumpy outline and the formation of an optimal dispersed soil surface with an increase in the soil structure coefficient in the range of 0.36–0.54 was also established.

Key words: *agrophysical degradation of soil, density, porosity, soil structure, green manure.*

Вступ

Результати наукових узагальнень (Стрілець, 2022) засвідчують, що найбільш доцільні напрями використання земель сільськогосподарського призначення та відтворення родючості ґрунтів, виходячи із реальної ситуації землевикористання в Україні, мають обов'язково базуватись на альтернативних (біологізованих) системах сівозмін, удобрення із максимальним залученням побічної продукції для забезпечення бездефіцитних балансів органіки та основних елементів живлення, підтримання природніх процесів реставрації ґрунтових процесів для зниження темпів деградації, які набирають загрозливого характеру.

У доповнення до цих тверджень наголошується (Зайцев та ін., 2022) на необхідності розробки для України, особливо в регіонах із середнім та низьким потенціалом ґрунтової родючості, агротехнологій, які передбачали б максимально ефективне та обґрунтоване використання побічної продукції сільськогосподарських культур, насичення сівозмін проміжними культурами різного типу для різновидової сидерації, використання органічних сільськогосподарських відходів та продуктів первинної переробки для альтернативних класичних варіантів систем удобрення. Це дозволить довести до нормативного показники індексу екологізації удобрення та дозволить стати на шлях стабілізації деградації ґрунтів.

Сучасний зарубіжний досвід у різних ґрунтово-кліматичних зонах із різним ґрунтовим покривом та специфікою використання сільськогосподарських угідь (Qaswar et al., 2019; Fan et al., 2020; Lei et al., 2022), підтверджує актуальність та необхідність застосування технологій сидерації, фіторемедіації та розширення спектру варіантів біоорганічного удобрення для відновлення родючості ґрунтів, забезпечення бездефіцитного балансу гумусу, мінімізацію ризиків від агрохімічної та агрофізичної деградації ґрунтового покриву.

Серед спектру видів деградації ґрунтового покриву агрофізична деградація для України набула загрозливих темпів і має найвищу вираженість за такими показниками як переущільнення та втрата агрономічно цінної структури (Медведєв та ін., 2020). Вчені підрахували, що переущільнення ґрунтів в Україні щорічно приводить

до втрат у середньому 159,6 млн, а в окремі роки до 0,5 млрд доларів і ця проблема має тенденцію до активного зростання внаслідок військової агресії росії (Проєкт Плану …, 2022).

В останніх дослідженнях відмічається, що для ґрунтового покриву агроландшафтів інтенсивного сільськогосподарського використання фіксуються сталі ознаки втрати структурованості особливо у частині частки часток віднесених до агрономічно цінних структурних агрегатів гранулометричного складу ґрунту (0,25–10 мм), що веде до послідовного ущільнення ґрунтового профілю (Медведєв і Пліско, 2017).

Підсилюється процес знеструктурення ґрунту за рахунок спряжених тенденцій до зниження вмісту гумусу та підвищення кислотності, що у підсумку формує брилисту структуру орного горизонту (агрегати розміром >10 мм) за одночасного зростання частки фракції пилу (агрегати < 0,25 мм). Такі структурні зміни зумовили зниження частки корисної фракції агрегатів в інтервалі 1,2–1,7 рази з огляду на тип ґрунту та відповідно ґрунтово-кліматичну зону вирощування (Булигін та ін., 2019). Такі зміни в свою чергу формують всі передумови для підвищення щільності ґрунту за нормативним оцінюванням в одиницях г/см^3 при зростанні показника щонайменше на 15–30% за одночасного зниження агрегатної міцності часток ґрунту в 1,2–1,5 рази, що веде до зростання чинника дисперсності ґрунтових агрегатів мінімум на два порядки (Балюк та ін., 2017). З огляду на визначені тенденції деградації для ґрунтового покриву України питання орієнтації агротехнологічних рішень за чинником ґрунтозбереження та ґрунтореабілітації набуває першочергового значення (Балюк і Медведєв, 2012). У плані таких рішень, з позиції збереження та відновлення агрофізичних показників ґрунтового профілю та оптимізації ґрунтової структури, рекомендуються біоконсервуючі та біоорганічні технології на основі широкого спектру використання сидеральних культур як адаптованого джерела альтернативних органічних добрив із високою технологічною ефективністю віддачі (Шувар, 2015; Трускавецький і Цапко, 2016; Іванишин та ін., 2016, 2020; Цицюра та ін., 2022).

Проте, не дивлячись на вивченість закономірностей сидерації та механізмів її дії на комплекс ґрунтових властивостей, багато питань цієї технології з огляду впливу на агрофізичні режими та параметри ґрунтового профілю є дискусійними, що актуалізує подальший напрямок даних досліджень особливо з огляду на конкретний біологічний вид обраної сидеральної культури на фоні відповідного рівня гідротермічного режиму територій.

Серед спектру застосованих сидеральних культур, олійна редька (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) виділяється особливим спектром цінних адаптивних властивостей (Цицюра та ін., 2022), а саме: невибагливість, високі рівні біопродуктивності як надземної, так і кореневої маси, толерантність до зміни строків використання, високий алелопатичний потенціал по відношенню до основних видів бур'янів, високий фіторемедіаційний та біофумігаційний потенціал. З огляду на це, вивчення ефективності та доцільності її використання у системі ґрунтозберігаючих та ґрунтовідновлюючих технологій є важливим науково-практичним завданням, що було покладено в основу наших багаторічних досліджень сидерального застосування листостеблової маси редьки олійної на сірих лісових ґрунтах із середнім рівнем їх агрофізичної деградації.

Матеріал і методи

Дослідження проводились впродовж 2019–2024 рр. на дослідному полі Вінницького національного аграрного університету (N 49°11′31″, E 28°22′16″) на сірих лісових ґрунтах. Агрохімічний потенціал поля мав такі середньобагаторічні показники: вміст гумусу 2,68% легкогідролізованого азоту 81,5 мг/кг ґрунту, рухомого фосфору 176,1 мг/кг ґрунту, обмінного калію 110,8 мг/кг ґрунту, pH_{KCl} 5,8. Для досліджень було обрано сорт Журавка. Припосівне конструювання агроценозу культури було проведено за вимогами формування сидеральних посівів редьки олійної за норми висіву 2,5 млн схожих насінин/га звичайним рядковим способом на неудобреному фоні з міжряддям 15 см.

Посів сидерату проводився відразу після збирання попередника на фоні проміжного комбінованого обробітку ґрунту (плоскоріз + ротаційне розпушування із вирівнюванням) на глибину 12–14 см у липні при даті фенологічного досягнення оптимальної фази багатокомпонентного використання біомаси редьки олійної на другу–третю декаду жовтня. Обліки було проведено на четвертий рік сидерального застосування редьки олійної на одній і тій же обліковій дослідній площі під різні попередники ярової групи

культур у варіанті літньої проміжної сидерації із співставленням значень до сидерації та на четвертий рік сидерації. За спряжений контроль було обрано той же варіант ланки сівозміни 4-х річного циклу ротації без застосування сидерації. На всіх варіантах досліду застосовувалась рекомендована технологія для відповідних видів полезаймаючих культур. Повторність досліду чотирьохразова з просторовим дистанціюванням від варіантів без сидерації на відстані 5 м. Площа ділянок 25 м^2.

Швидкість розкладу сидеральної маси та кумулятивний показник швидкості розкладу розраховували відповідно до методики (Kazakou et al., 2009).

Фотографічна фіксація поверхні ґрунту у різних варіантах досліду здійснювалась за використання цифрового фотоапарата Canon EOS 750D Kit 18–135 mm IS STM та додаткового об'єктиву Canon EF 100 mm f/2.8 Macro і UV світлофільтра. Процес фотографування проводився за принципом ортогональності із масштабною лінійкою та штучним затіненням.

Для графічної обробки зображень та їх дослідної інтерпретації було застосовано програми FijiImageJ2 та BaseGrain v. 2.2.0.4. Останній програмний продукт аналізує систему морфометричної сепарації часток, які формують аналізовану поверхню знімка за ортогональної фіксації фокусу. Даний аналіз передбачав отримання середньозваженого співвідношення малої та великої осей поверхні ґрунтових частин та умовної довжини абсиса їх контуру, як показано на рис. 1.

Агрофізичні параметри такі як: щільність ґрунту, шпаруватість – проводили відповідно до методик рекомендованих стандартами України у блокові агрофізичних властивостей ґрунту (Гаськевич та ін., 2021).

Фракційний склад ґрунту визначали стандартним методом сухого просіювання (ДСТУ, 2005).

Ступінь структурного розпушення ґрунту визначали за коефіцієнтом структурності (K_s) за рівнянням 1 (Панченко, 1999):

$$K_s = \frac{N_v}{N_g} \quad (1)$$

де: N_v – сума ґрунтових макроагрегатів розміром від 0,25 до 10 мм, %; N_g – сума ґрунтових агрегатів < 0,25 мм і грудок > 10 мм, %.

Ступінь інтегрального зв'язку з основними показниками базових факторів системи

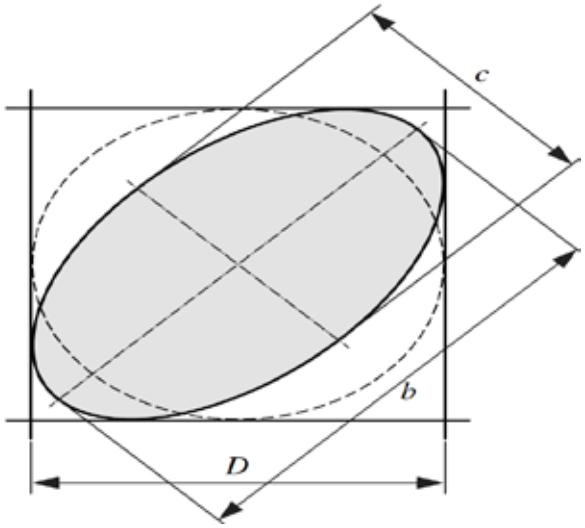


Рис. 1. Параметри детермінації морфометрії ґрунтових частинок у системі програми BaseGrain (за Stähly et al., 2017)

дослідження оцінювали застосуванням загальної схеми парного кореляційного аналізу із формуванням відповідної кореляційної матриці.

Статистичну обробку отриманих даних проводили за загальноприйнятими методами варіаційної статистики та застосування принципів статистичної різниці за результатами порівняння при допомозі тесту Тьюкі з поправкою Бонферроні (Wong et al., 2018) у середовищі статистичної програми Statistica 10 (StatSoft – Dell Software Company, США).

Результати

Встановлено, що умови гідротермічного режиму періоду досліджень відповідали середньопозитивному температурному режиму із значним варіюванням за показником суми опадів, що у підсумку забезпечило таку ж високу варіативність індексу зволоження на рівні 27,9%. Визначена варіативність за рахунок безпосереднього впливу на процеси ґрунтового розкладу листостеблової маси редьки олійної та з огляду на результати парного кореляційного аналізу, де саме індекс зволоження мав найвищу тісноту зв'язку із показником кумулятивного розкладу сидеральної листостеблової маси (0,831 при $p<0,05$) – зумовила різні темпи кумулятивного розкладу маси у ґрунті (табл. 1).

При цьому, варіювання показника кумулятивного розкладу було у двічі меншим, що вказує на наявність додаткових систем-

Таблиця 1

Гідротермічні параметри періоду сидерального використання редьки олійної, 2019–2024 рр.

Показники оцінки для періоду VII–XII/I–IV	**За період**					
	Середньо-добова температура повітря, °С	**Сума температур, °С**	**Сума опадів, мм**	**Середня відносна вологість повітря, %**	**Індекс зволоження, мм/°С**	**Загальний показник кумулятивності розкладу сидеральної маси, %**
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
2019/2020	8,80	2675,5	420,7	72,5	0,157	88,4 ± 0,89[b**]
2020/2021	7,68	2335,1	656,4	77,8	0,281	93,7 ± 1,05[c]
2021/2022	7,66	2329,3	481,2	78,5	0,207	83,5 ± 0,77[a]
2022/2023	8,41	2546,8	855,5	78,1	0,336	95,8 ± 0,89[d]
2023/2024	10,05	3056,5	747,9	76,8	0,245	90,2 ± 1,05[b]
Результати парної кореляції між показниками						
Пари ознак	1	2	3	4	5	6
1		1,000*	0,284	-0,378	-0,119	0,070
2			0,273	-0,382	-0,131	0,058
3				0,544*	0,917*	0,810*
4					0,697*	0,187
5						0,831*

** – достовірність щонайменше на 5% рівні значущості; ** – рівні значущості (за тестом Тьюкі з поправкою Бонферроні): однакові літери визначають належність показника до однієї статистичної групи.*

них факторів не введених на даному етапі формування даних з позиції ґрунтового потенціалу (температура ґрунту, рівень його мікробіологічної активності, інтенсивність анаеробної ферментації тощо).

З огляду на рівень кумулятивного розкладу листостеблова маса редьки олійної, застосована для сидерації на фазу цвітіння, належить до групи із швидкими темпами мінералізації, що з одного боку є позитивним з позиції строків застосування сидерації у межах відповідних ланок сівозмін, а з іншого боку не сприяє позитивнодинамічному накопиченню ряду складових компонентів отриманих унаслідок мінералізації сидеральної маси. При цьому підтверджено ефективну можливість розкладу сидеральної маси редьки олійної у зоні досліджень за літнього проміжного її використання, враховуючи рівень середньодобової температури вище біологічного мінімуму (+5°С) за весь період оцінки та середнього ступеню розкладення на рівні 90,72%.

Це позитивно узгоджується з результатами підсумкового моніторингу впливу циклу застосованої сидерації на структурно-агрегатний склад сірого лісового ґрунту у оцінці для товщини 0–30 см (табл. 2).

За результатами стартового моніторингу досліджуваний ґрунт за визначеного агрегатного стану на 2019 рік при коефіцієнті структурності 1,76 було віднесено до категорії середнього рівня агрофізичної деградації з позиції значної частки брилистої фракції (> 10 мм) близько 30%, а наявність у структурі більше 10% мулистої та пилової фракцій (0,5–0,25%) формує схильність до формування ґрунтової кірки та позитивної динаміки у зростанні об'ємної маси у період від фізичної стиглості ґрунту до його входження у зиму. За цих умов, у обліковій динаміці з співставленням до контролю сидеральне використання редьки олійної сприяло оптимізації структурного стану ґрунту зі зростання частки агрономічно цінних агрегатів на 6,9% в цілому за відповідного зниження частки брилистої та мулистої фракцій відповідно на 3,2% та 0,4% відповідно. При цьому інертність змін мулистої фракції була вищою у динаміці, ніж брилистої фракції, що зумовлено генезисними особливостями формування сірих лісових ґрунтів.

Таблиця 2

Співставні зміни фракційного структурно-агрегатного складу сірого лісового ґрунту для горизонту профілю 0–30 см на ділянках систематичного чотирьохрічного циклу сидерації, % (співставлення 2019/2024 р.)

Фракції ґрунту за методом сухого просіювання, мм	**Перед сівбою сидерату редьки олійної (перший рік досліджень) (2019 рік)**	**Фаза фізичної стиглості ґрунту, 2024 рік**	
		контроль	**4-х річний цикл літньої проміжної сидерації**
>10	30,3 ± 1,4	28,8 ± 1,7	25,6 ± 2,1**
10–7	11,1 ± 1,6	10,5 ± 1,6	9,1 ± 1,7*
7–5	6,8 ± 1,9	7,9 ± 1,7	9,8 ± 1,9**
5–3	16,6 ± 2,3	17,4 ± 1,5	18,5 ± 1,5**
3–2	6,1 ± 1,2	7,2 ± 1,9	8,4 ± 1,5*
2–1	14,5 ± 1,5	15,4 ± 2,1	15,8 ± 1,8*
1–0,5	3,8 ± 0,9	3,4 ± 1,4	4,1 ± 1,5*
0,5–0,25	4,9 ± 1,3	4,5 ± 1,8	4,1 ± 1,2*
<0,25	5,9 ± 1.7	5,2 ± 2.1	4,8 ± 1,7*
Коефіцієнт структурності (K_s)	1,76	1,94	2,30

*Критерії значущості для системи варіантів сидерація–контроль: * – p<0,05; ** – p<0,01.*

На контрольному варіанті також відмічено певні позитивні зрушення у сторону поліпшення агрегатного стану за рахунок впливу системи обробітку та вирощування відповідних видів сільськогосподарських рослин зі зростанням коефіцієнту структурності на 0,18. При цьому, зростання даного показника за 4-х річного циклу перманентного сидерального утримання ґрунту склало 0,36 до динамічного контролю та 0,54 до вихідних умов при закладенні досліду, що склало відповідно 18,6% та 30,7%.

Вказані результати підтверджено наочно за використання програмних пакетів програм FijiImageJ2 та BaseGrain v. 2.2.0.4 за використання відповідних плагінних систем аналізу структурних елементів поверхні (рис. 2). Так, відповідно до сформованої поверхні 3D візуалізації, контрольний варіант без сидерації мав істотно вищу амплітуду розмаху розмірності поверхні та нерівномірність рисунка по зовнішній площині поверхні та за глибиною, ніж це характерно для варіанті знімка за 4-х річного циклу сидерації із використанням редьки олійної.

Аналогічні результати було отримано і за обробки знімка у середовищі програми BaseGrain v. 2.2.0.4 (рис. 3). Відповідно до статистичної інтерпретації результатів такої обробки на контрольному варіанті середній індекс співвідношення великої та малої осі ґрунтових частинок склав 3,3, а для варіанту із 4-х річним циклом сидерації – 2,1 при показник довжини кола абрису ґрунтової частини 31,48 см та 18,84 см відповідно.

Такий характер підтверджує з одного боку загальне зменшення брилистості ґрунту, а з іншої – на ріст дрібних фракцій у загальній структурі ґрунтового шару, відміченого на поверхні знімка у системі ортогонального фокуса.

Позитивні зрушення у фракційному складі ґрунту закономірно відобразились на спряжених із гранулометричним складом показниках видів шпаруватості та щільності структури ґрунту позитивно відобразились і на таких важливих агрофізичних показниках як шпаруватість та щільність (табл. 3).

Відповідно до облікової оцінки вказаних показників у співставленні контролю та чотирьохрічного періоду сидерації відмічено позитивноформуючий вплив на окреслені параметри ґрунту. Встановлено у підсумку зростання загальної шпаруватості ґрунту на 10,0%, капілярної шпаруватості – на 10,2%, некапілярної – на 9,8% при зростанні шпаруватості аерації на 7,3%. За такої результуючої дії оптимізації структури ґрунту досягнуто зниження його щільності в моніторинговому шарі 0–30 см на 6,9%, що має загальний позитивний вплив на забезпечення відповідних режимів ґрунтових умов родючості.

Обговорення

Важливим в оцінці сидераційного ефекту є рівень мінералізації сидеральної маси

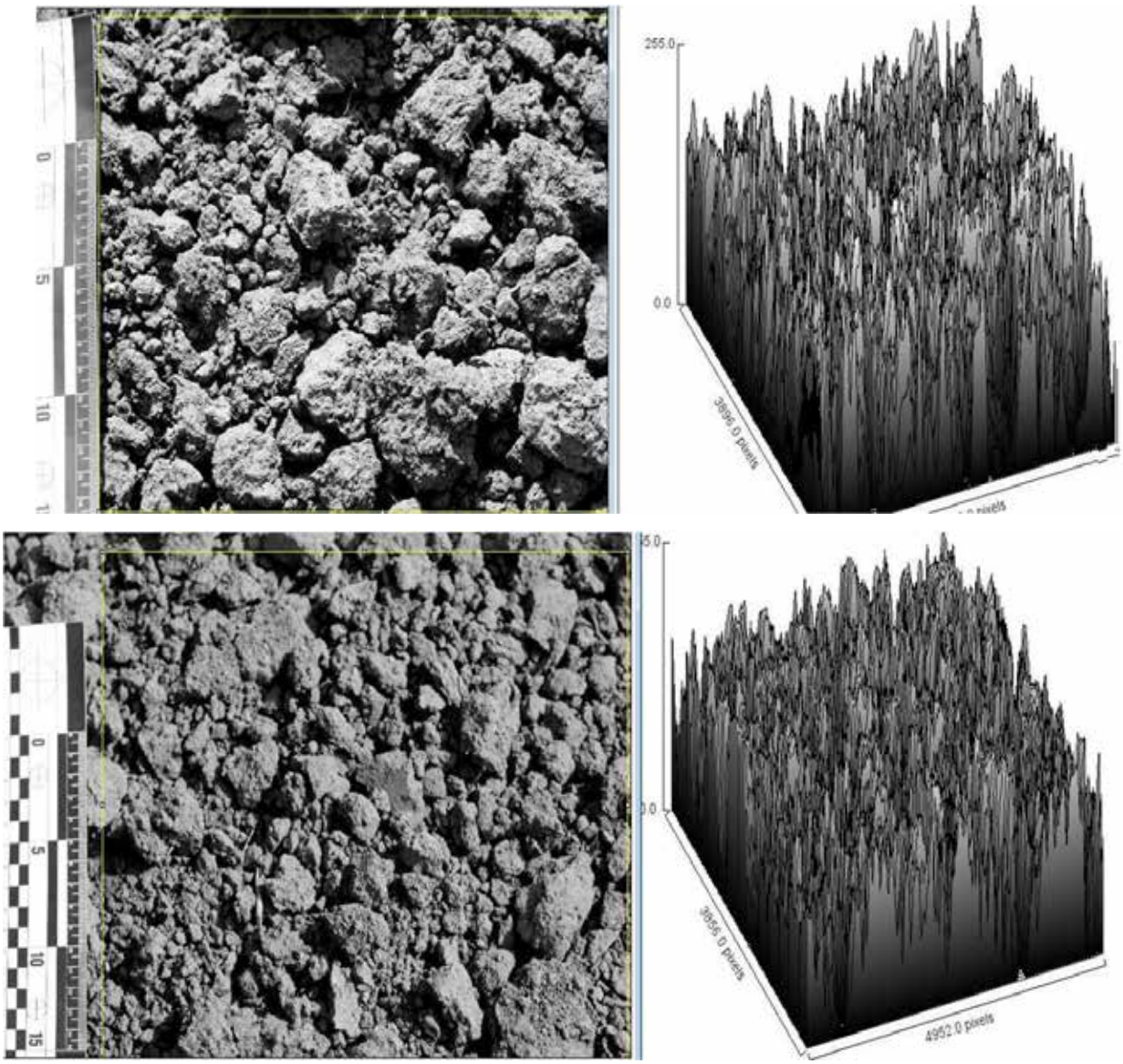


Рис. 2. Знімки поверхні ґрунту оброблені програмою FijiImageJ2 (верхня позиція контроль, нижня позиція після останнього туру сидерації

у ґрунті та процес іммобілізації її ґрунтово-вбирним комплексом. Відмічається (Шувар, 2015; Цицюра та ін., 2022), що як процес формування надземної листостеблової маси редьки олійної, так і процесу її розкладу у ґрунті сприяє підвищений температурний режим та достатня зволоженість періоду від початку культивування сидерату до початку відповідних весняних технологічних операцій на відповідному полі після сидерації. Тобто оптимум показника швидкості розкладу сидеральної маси буде зростати за вищого значення показника індексу зволоження. З огляду на параметри гідротермічного режиму від дати посіву сидерату до дати початку ґрунтообробних робіт на ділянках сидерації представлені у табл. 1 – оптимум темпів іммобілізації сидеральної маси відповідав періодам 2022/2023 рр. та 2020/2021 рр. На підставі ряду досліджень (Іванишин, 2020; Fan et al., 2020) такі умови з високою ймовірністю формують позитивний вплив на загальний рівень оптимізації ґрунтових умов родючості як з позиції балансу органічної речовини, так і з позиції похідної агрегації структурних елементів ґрунтового профілю. Вказані темпи розкладу дозволяють досягнути інтенсифікуючого показника процесів різнофракційного накопичення гумусових сполук та їх похідних, що з огляду на ряд оцінок (Ramirez-Garcia et al., 2015) сприяє

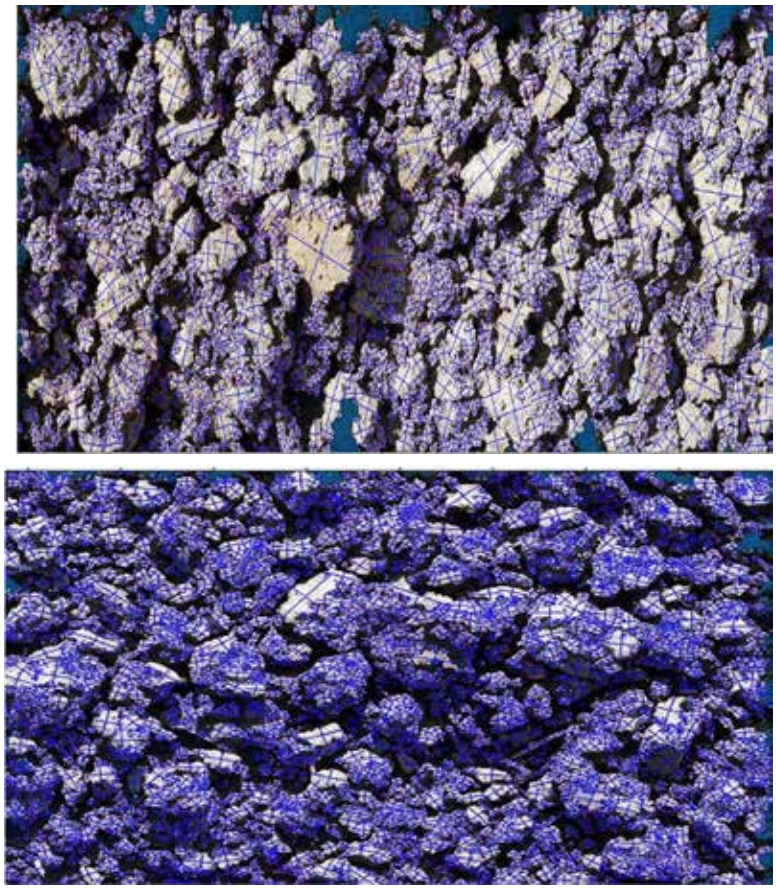


Рис. 3. Знімки поверхні ґрунту оброблені програмою BaseGrain v. 2.2.0.4 (верхня позиція контроль, нижня позиція – після останнього туру сидерації)

Таблиця 3

Оцінка шпаруватості та щільності ґрунту за різних варіантів утримання з обліком на фазу фізичної стиглості ґрунту до початку перших механізованих операцій (середнє за чотири цикли сидерації, 2019–2024 рр.)

Шпаруватість	**Глибина, см**	**Контроль**	**Сидерація**	***НІР$_{05}$**
Загальна, %	0–10	42,38	44,89	1,47
	10–20	41,62	46,63	1,26
	20–30	40,07	45,00	0,96
	0–30	41,36	45,51	1,24
Капілярна, %	0–10	22,39	23,06	0,36
	10–20	23,28	26,44	0,73
	20–30	22,87	26,04	0,51
	0–30	22,85	25,18	0,71
Некапілярна, %	0–10	19,99	21,84	0,95
	10–20	18,34	20,19	0,79
	20–30	17,20	18,96	0,70
	0–30	18,51	20,33	0,84
Аерації, %	0–10	21,12	23,08	0,58
	10–20	18,13	19,06	0,49
	20–30	14,32	15,35	0,43
	0–30	17,86	19,16	0,47
Щільність, г/см^3	0–10	1,36	1,28	0,04
	10–20	1,46	1,32	0,05
	20–30	1,52	1,45	0,06
	0–30	1,45	1,35	0,05

** – за вимогами калькуляції НІР лише після тригонометричного арктангенсного перетворення.*

процесам агрегації ґрунтових часток та зміні у структурі співвідношення фракційного їх вмісту.

Встановлене у дослідженнях підвищення вмісту агрономічно цінної фракції структурних агрегатів, позитивно корелює із дослідженнями при застосуванні різних видів сидератів у різних ґрунтово-кліматичних зонах при значенні від 5,5 до 40,8% у загальній структурі співставлення контроль-сидерація (Fanish, 2017; Lei et al., 2022; Patra et al., 2023). З цієї позиції редьку олійну можна віднести до культур із високим потенціалом для сидеральної оптимізації агрофізичних параметрів ґрунтового профілю.

Доведена позитивна роль сидеральних культур і в поліпшення різних категорій пористості (Sharma et al., 2018; Ugrenović et al., 2019; Patra et al., 2023), зокрема зростання капілярної шпаруватості на 3,7–8,9% за багаторічного варіанту сидерального утримання ґрунту при оптимізації щільності за рахунок її зменшення в інтервалі від 0,08–0,25 г/см^3. З огляду на ці твердження, доведено доцільність використання редьки олійної як сидерату на ґрунтах переущільнених із низькими значеннями шпаруватості аерації та загальної шпаруватості де позитивний ріст за 4-х річний цикл застосування склав інтервал від 7,3 до 10,2%.

Висновки

У загальному підсумку, визначений позитивний вплив на формування ґрунтової структури (зростання фракції агрономічно цінних агрегатів на 6,9%) та одночасної оптимізації базових рівнів шпаруватості (збільшення загальної шпаруватості на 10%, шпаруватості аерації на 7,3%) та зниження щільності на 6,9% за сидерального перманентного використання редьки олійної на сірих лісових ґрунтах. На підставі таких результатів за доцільне слід рекомендувати проміжний (літній) варіант сидерації для ґрунтово-кліматичних зон нестійкого зволоження з використанням редьки олійної у сівозмінах різної ротації у системі біоорганічних та ґрунтореабілітаційних технологій, особливо на ґрунтах із вираженими ознаками агрофізичної деградації.

Список використаної літератури

Балюк С.А., Медведєв В.В. Стратегія збалансованого використання, відтворення і управління ґрунтовими ресурсами України. К. : Аграрна наука. 2012. 239 с.

Балюк С.А., Медведєв В.В., Воротинцева Л.І., Шимель В.В. Сучасні проблеми деградації ґрунтів і заходи щодо досягнення нейтрального її рівня. *Вісник аграрної науки.* 2017. № 8. С. 5–11.

Булигін С.Ю., Вітвіцький С.В., Буланий О.В., Тонха О.Л. Моніторинг якості ґрунтів. К.: Видавництво НУБіП України, 2019. 421 с.

Гаськевич В.Г., Папіш І.Я., Телегуз О.Г. Фізика ґрунтів. Лабораторний практикум. Навчальний посібник. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2021. 170 с.

ДСТУ ISO 11277:2005. Якість ґрунту. Визначення гранулометричного складу мінерального матеріалу ґрунту. Метод просіювання та седиментації (ISO 11277:1998, IDT). 2005. 32 с.

Зайцев Ю., Кирильчук А., Ослопова М. Побічна продукція як елемент біологізації землеробства ґрунтів Київської області. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Агрономія та біологія.* 2022. Вип. 2 (48). С. 63–68.

Іванишин В.В., Роїк М.В., Шувар І.А., Центило Л.В., Сендецький В.М., Бунчак О.М., Колісник Н.М. Біологізація землеробства в Україні: реалії та перспективи: науково-виробниче видання. Івано-Франківськ : Симфонія форте, 2016. 284 с.

Іванишин В.В., Шувар І.А., Бахмат М.І., Сендецький В.М., Танчик С.П., Центило Л.В., Бунчак О.М., Мельничук Т.В. Солома, післяжнивні рештки і сидерати – агротехнологічні елементи біологізації сучасного землеробства: монографія / за заг. ред. І.А. Шувара, В.М. Сендецького. Івано-Франківськ : Симфонія форте, 2020. 292 с.

Медведєв В.В., Пліско І.В. Критерії і нормативи фізичної деградації орних ґрунтів (пропозиції до вдосконалення нормативної бази). *Вісник аграрної науки.* 2017. № 3. С. 11–17.

Медведєв В.В., Пліско І.В., Крилач С.І., Накісько С.Г., Уваренко К.Ю. Фізична деградація орних ґрунтів України (оцінювання, профілактика, призупинення). Харків : ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського», 2020. 110 с.

Панченко А.Н. Теорія подрібнення ґрунту ґрунтообробними робочими органами. Дніпропетровськ, 1999. 139 р.

Проєкт Плану відновлення України. *Матеріали робочої групи «Екологічна безпека». Національна рада з відновлення України від наслідків війни.* 2022. [Електронний ресурс]. URL:

https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/environmental-safety-assembly.pdf (дата звернення 25.10.2024).

Стрілець І.Ю. Концептуальні напрями вдосконалення системи охорони земель сільськогосподарського призначення та відтворення родючості ґрунтів: український та зарубіжний аспект. *Проблеми сучасних трансформацій. Серія: право, публічне управління та адміністрування.* 2022. № 6. [Електронний ресурс]. URL: https://reicst.com.ua/pmtl/article/view/2022-6-01-17 (дата звернення 26.10.2024).

Трускавецький Р.С., Цапко Ю.Л. Основи управління родючістю ґрунтів. Харків, 2016. 388 с.

Цицюра Я.Г., Неїлик М.М., Дідур І.М., Поліщук М.І. Сидерація як базова складова біологізації сучасних систем землеробства. Монографія. Вінниця : Видавець ТОВ «Друк», 2022. 770 с.

Шувар І.А. Сидерати в сучасному землеробстві. Івано-Франківськ : Симфонія форте, 2015. 156 с.

Fan Z.L., Chai Q., Cao W.D., Yu A.Z., Zhao C., Xie J.H., Yin W., Hu F.L. Ecosystem service function of green manure and its application in dryland agriculture of China. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao.* 2020. Vol. 31. № 4. P. 1389–1402.

Fanish S.A. Impact of Green Manure Incorporation on Soil Properties and Crop Growth Environment: A Review. *World Journal of Agricultural Sciences.* 2017. Vol. 13. № 3. P. 122–132.

Kazakou E., Violle C., Roumet C., Pintor C., Gimenez O., Garnier E. Litter quality and decomposability of species from a Mediterranean succession depend on leaf traits but not on nitrogen supply. *Annals of Botany.* 2009. Vol. 104. №. 6. P. 1151–1161.

Lei B., Wang J., Yao H. Ecological and Environmental Benefits of Planting Green Manure in Paddy Fields. *Agriculture.* 2022. Vol. 12 (2). P. 223.

Patra A., Singh R.P., Kundu M.S., Kumar G., Malkani P., Singh B.K., Choudhury S., Kundu A., Mukherjee S. Green Manuring: A Sustainable Approach for Soil Health Improvement. *Agricultural and food: E-Newsletter.* 2023. Vol. 5. №. 4. P. 198–201.

Qaswar M., Huang J., Ahmed W., Li D., Liu S., Ali S., Liu K., Xu Y., Zhang L., Liu L. Long-Term Green Manure Rotations Improve Soil Biochemical Properties, Yield Sustainability and Nutrient Balances in Acidic Paddy Soil under a Rice-Based Cropping System. *Agronomy.* 2019. Vol. 9. № 12. P. 780.

Quintarelli V., Radicetti E., Allevato E., Stazi S.R., Haider G., Abideen Z., Bibi S., Jamal A., Mancinelli R. Cover Crops for Sustainable Cropping Systems: A Review. *Agriculture.* 2022. Vol. 12. P. 2076.

Ramirez-Garcia J., Gabriel J.L., Alonso-Ayuso M., Quemada M. Quantitative characterization of five cover crop species. *The Journal of Agricultural Science.* 2015. Vol. 153. № 7. P. 1174–1185.

Sharma P., Singh A., Kahlon C.S., Brar A.S., Grover K., Dia M., Steiner R.L. The Role of Cover Crops towards Sustainable Soil Health and Agriculture – A Review Paper. *American Journal of Plant Sciences.* 2018. Vol. 09. P. 1935–1951.

Stähly S., Friedrich H., Detert M. Size ratio of fluvial grains' intermediate axes assessed by image processing and square-hole sieving. *Journal of Hydraulic Engineering.* 2017. Vol. 143. P. 1–6.

Ugrenović V., Filipović, V., Jevremović, S., Marjanović J.A., Popović, V., Buntić A., Delić, D. Effect of Brassicaceae as cover crops. *Selekcija i semenarstvo.* 2019. Vol. 25. № 2. P. 1–8.

Wong J. Handbook of statistical analysis and data mining applications. Cambridge, Academic Press, 2018. 589 p.

References

Baliuk, S.A., & Medvediev, V.V. (2012). Stratehiia zbalansovanoho vykorystannia, vidtvorennia i upravlinnia gruntovymy resursamy Ukrainy [Strategy of balanced use, reproduction and management of soil resources of Ukraine]. K. : Ahrarna nauka [in Ukrainian].

Baliuk, S.A., Medvediev, V.V., Vorotyntseva, L.I., & Shymel, V.V. (2017). Suchasni problemy dehradatsii gruntiv i zakhody shchodo dosiahnennia neitralnoho yii rivnia [Modern problems of soil degradation and measures to achieve its neutral level.]. *Visnyk ahrarnoi nauky [Bulletin of Agrarian Science]*, 8, 5–11. https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201708-01 [in Ukrainian].

Bulyhin, S.Iu., Vitvitskyi, S.V., Bulanyi, O.V., & Tonkha O.L. (2019). Monitorynh yakosti gruntiv [Monitoring of soil quality]. K. : Vydavnytstvo NUBiP Ukrainy [in Ukrainian].

Haskevych, V.H., Papish, I.Ia., & Telehuz, O.H. (2021). Fizyka gruntiv. Laboratornyi praktykum. Navchalnyi posibnyk [Soil physics. Laboratory workshop. Study guide]. Lviv : LNU imeni Ivana Franka [in Ukrainian].

DSTU ISO 11277:2005. (2005). Yakist gruntu. Vyznachennia hranulometrychnoho skladu mineralnoho materialu gruntu. Metod prosiiuvannia ta sedymentatsii [Soil quality. Determination of the particle size distribution of soil mineral material. Sieving and sedimentation method] (ISO 11277:1998, IDT) [in Ukrainian].

Zaitsev, Yu., Kyrylchuk, A., & Oslopova, M. (2022). Pobichna produktsiia yak element biolohizatsii zemlerobstva gruntiv Kyivskoi oblasti [By-products as an element of biologization of agricultural soils of Kyiv region]. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Seriia: Ahronomiia ta biolohiia [Bulletin of Sumy National Agrarian University. Series: Agronomy and biology]*, 2(48), 63–68. https://doi.org/10.32845/agrobio.2022.2.10 [in Ukrainian].

Ivanyshyn, V.V., Roik, M.V., Shuvar, I.A., Tsentylo, L.V., Sendetskyi, V.M., Bunchak, O.M., & Kolisnyk, N.M. (2016). Biolohizatsiia zemlerobstva v Ukraini: realii ta perspektyvy: naukovo-vyrobnyche vydannia [Biologisation of agriculture in Ukraine: realities and prospects: a scientific and production publication]. Ivano-Frankivsk : Symfoniia forte [in Ukrainian].

Ivanyshyn, V.V., Shuvar, I.A., Bakhmat, M.I., Sendetskyi, V.M., Tanchyk, S.P., Tsentylo, L.V., Bunchak, O.M., & Melnychuk, T.V. (2020). Soloma, pisliazhnyvnireshtkyi syderaty–ahrotekhnolohichni elementy biolohizatsii suchasnoho zemlerobstva: monohrafiia [Straw, post-harvest residues and green manure - agrotechnological elements of biologization of modern agriculture: a monograph] / za zah. red. I.A. Shuvara, V.M. Sendetskoho. Ivano-Frankivsk : Symfoniia forte [in Ukrainian].

Medvediev, V.V., & Plisko, I.V. (2017). Kryterii i normatyvy fizychnoi dehradatsii ornykh gruntiv (propozytsii do vdoskonalennia normatyvnoi bazy) [Criteria and standards of physical degradation of arable soils (proposals for improving the regulatory framework)]. *Visnyk ahrarnoi nauky [Bulletin of Agrarian Science]*, 3, 11–17. https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201703-02 [in Ukrainian].

Medvediev, V.V., Plisko, I.V., Krylach, S.I., Nakisko, S.H., & Uvarenko K.Iu. (2020). Fizychna dehradatsiia ornykh gruntiv Ukrainy (otsiniuvannia, profilaktyka, pryzupynennia) [Physical degradation of arable soils in Ukraine (assessment, prevention, suspension)]. Kharkiv : NNTs «Instytut gruntoznavstva ta ahrokhimii imeni O. N. Sokolovskoho» [in Ukrainian].

Panchenko, A.N. (1999). Teoriia podribnennia gruntu gruntoobrobnymy robochymy orhanamy [The theory of soil crumbling by tillage tools]. Dnipropetrovsk [in Ukrainian].

Proiekt Planu vidnovlennia Ukrainy [Draft Recovery Plan for Ukraine. Materials of the working group 'Environmental Safety'] (2022). *Materialy robochoi hrupy «Ekolohichna bezpeka». Natsionalna rada z vidnovlennia Ukrainy vid naslidkiv viiny [National Council for the Reconstruction of Ukraine from the Consequences of War]*. [Electronic resource] URL: https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/environmental-safety-assembly.pdf (access date 25.10.2024) [in Ukrainian].

Strilets, I.Iu. (2022). Kontseptualni napriamy vdoskonalennia systemy okhorony zemel silskohospodarskoho pryznachennia ta vidtvorennia rodiuchosti gruntiv: ukrainskyi ta zarubizhnyi aspekt [Conceptual directions for improving the system of agricultural land protection and soil fertility reproduction: Ukrainian and foreign aspects.]. *Problemy suchasnykh transformatsii. Seriia: pravo, publichne upravlinnia ta administruvannia [Problems of modern transformations. Series: law, public administration and management]*, 6. [Electronic resource] URL: https://reicst.com.ua/pmtl/article/view/2022-6-01-17 (access date 26.10.2024) [in Ukrainian].

Truskavetskyi, R.S., & Tsapko, Yu.L. (2016). Osnovy upravlinnia rodiuchistiu gruntiv [Fundamentals of soil fertility management]. Kharkiv [in Ukrainian].

Tsytsiura, Ya.H., Neilyk, M.M., Didur, I.M., & Polishchuk, M.I. (2022). Syderatsiia yak bazova skladova biolohizatsii suchasnykh system zemlerobstva. Monohrafiia [Green manure as a basic component of biologisation of modern farming systems. Monograph]. Vinnytsia : Vydavets TOV «Druk» [in Ukrainian].

Shuvar, I.A. (2015). Syderaty v suchasnomu zemlerobstvi [Green manure in modern farming]. Ivano-Frankivsk : Symfoniia forte. [in Ukrainian].

Fan, Z.L., Chai, Q., Cao, W.D., Yu, A.Z., Zhao, C., Xie, J.H., Yin, W., & Hu, F.L. (2020). Ecosystem service function of green manure and its application in dryland agriculture of China. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao*, 31(4), 1389–1402. https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202004.023 [in English].

Fanish, S.A. (2017). Impact of Green Manure Incorporation on Soil Properties and Crop Growth Environment: A Review. *World Journal of Agricultural Sciences,* 13 (3), 122–132. https://doi.org/10.5829/idosi.wjas.2017.122.132 [in English].

Kazakou, E., Violle, C., Roumet, C., Pintor, C., Gimenez, O., & Garnier, E. (2009). Litter quality and decomposability of species from a Mediterranean succession depend on leaf traits but not on nitrogen supply. *Annals of Botany*, 104 (6), 1151–1161. https://doi.org/10.1093/aob/mcp202 [in English].

Lei, B., Wang, J., & Yao, H. (2022). Ecological and Environmental Benefits of Planting Green Manure in Paddy Fields. *Agriculture*, 12 (2). 223. https://doi.org/10.3390/agriculture12020223 [in English].

Patra, A., Singh, R.P., Kundu, M.S., Kumar, G., Malkani, P., Singh, B.K., Choudhury, S., Kundu, A., & Mukherjee, S. (2023). Green Manuring: A Sustainable Approach for Soil Health Improvement. *Agricultural and food: E-Newsletter*, 5 (4), 198–201. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9783-8_20 [in English].

Qaswar, M., Huang, J., Ahmed, W., Li, D., Liu, S., Ali, S., Liu, K., Xu, Y., Zhang, L., & Liu, L. (2019). Long-Term Green Manure Rotations Improve Soil Biochemical Properties, Yield Sustainability and Nutrient Balances in Acidic Paddy Soil under a Rice-Based Cropping System. *Agronomy*, 9 (12), 780. https://doi.org/10.3390/agronomy9120780 [in English].

Quintarelli, V., Radicetti, E., Allevato, E., Stazi, S.R., Haider, G., Abideen, Z., Bibi, S., Jamal, A., & Mancinelli, R. (2022). Cover Crops for Sustainable Cropping Systems: A Review. *Agriculture,* 12, 2076. https://doi.org/doi:10.3390/agriculture12122076 [in English].

Ramirez-Garcia, J., Gabriel, J.L., Alonso-Ayuso, M., & Quemada, M. (2015). Quantitative characterization of five cover crop species. *The Journal of Agricultural Science*, 153 (7), 1174–1185. https://doi.org/10.1017/S0021859614000811 [in English].

Sharma, P., Singh, A., Kahlon, C.S., Brar, A.S., Grover, K., Dia, M., & Steiner, R.L. (2018). The Role of Cover Crops towards Sustainable Soil Health and Agriculture – A Review Paper. *American Journal of Plant Sciences,* 09, 1935–1951. https://doi.org/10.4236/AJPS.2018.99140 [in English].

Stähly, S., Friedrich, H., & Detert, M (2017). Size ratio of fluvial grains' intermediate axes assessed by image processing and square-hole sieving. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143, 1–6. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001286 [in English].

Ugrenović, V., Filipović, V., Jevremović, S., Marjanović, J.A., Popović, V., Buntić, A., & Delić, D. (2019). Effect of Brassicaceae as cover crops. *Selekcija i semenarstvo*, 25 (2), 1–8. https://doi.org/10.5937/SelSem1902001U (in Serbian).

Wong, J. (2018). Handbook of statistical analysis and data mining applications. Cambridge, Academic Press. http://doi.org/10.1016/C2012-0-06451-4 [in English].

Отримано: 22.10.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

УДК 633.11:632.5:632.95
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.18

ОЦІНКА ВПЛИВУ ХІМІЧНИХ ЗАХОДІВ НА ЗАБУР'ЯНЕНІСТЬ І УРОЖАЙНІСТЬ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ

Ю. М. Шкатула[1], А. О. Рац[2]

В умовах змін клімату в напрямі потепління для одержання стабільно високої врожайності зерна пшениці озимої важливе значення має застосування технологічних заходів, які сприятимуть підвищенню продуктивності і якості вирощеної продукції. Розробка найбільш ефективної та агроекологічної системи контролювання бур'янів із використанням сучасних гербіцидів і біопрепаратів під час вирощування озимої пшениці є надзвичайно важливими елементами в технології даної культури.

Мета роботи – виявити особливості формування зернової продуктивності озимої пшениці залежно від біопрепаратів і застосування гербіцидів в осінній період.

Дослідження проводились на протязі 2022–2023 років в умовах дослідного поля Вінницького національного аграрного університету с. Агрономічне Вінницького району. Експериментальну роботу виконували щодо контролювання бур'янів у посівах за рахунок проведення хімічних заходів. У процесі виконання дослідження використовували поєднання методів загальнонаукових: гіпотеза, спостереження, аналіз; та спеціальних: лабораторний і польовий. Показники обробляли методами математичної статистики. Аналізуючи видовий склад бур'янів, відмітимо, що на ділянках в осінній період за появи 3-го листочка пшениці нараховувалось 45 шт/м^2 бур'янів. Найкраща дія щодо зменшення бур'янової рослинності на посівах пшениці відмічена на ділянках, де насіння пшениці перед посівом оброблялось біопрепаратом Органік-баланс, а у фазу початок кущення вносився гербіцид Калібр і ПАР Тренд 90. Зменшення бур'янової рослинності в порівнянні з контрольними ділянками за обліками на період збирання зерна пшениці показали рівень зниження в порівнянні з контрольними ділянками на 90,8%, серед них кількість злакових бур'янів зменшилось на 82,9%, дводольних – 96,2%. Урожайність зерна пшениці в середньому за два роки на контрольних ділянках була в межах 2,34 т/га. За осіннього внесення гербіциду Калібр в нормі витрати 50 г/га та ПАР Тренд 90 рівень урожайності зерна пшениці була в межах 4,64 т/га, приріст до контролю становив 2,30 т/га або 98%. На ділянках, де насіння озимої пшениці оброблялось біопрепаратом Органік-баланс і вносився восени гербіцид Калібр з ПАР Тренд 90, рівень урожайності зерна становив 5,34 т/га, приріст до контролю був на рівні 128%. Проведені

[1] кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
завідувач кафедри землеробства ґрунтознавства та агрохімії
(Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця)
e-mail: skatulaurij@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4275-309X
[2] фахівець (ПРаТ «МХП»)
e-mail: rats.a@ukr.net
ORCID: 0009-0001-2879-1233

дослідження сприяють можливостям перенесенню внесення післясходових гербіцидів з весняного періоду на осінній.

***Ключові слова**: агроценоз, пшениця, гербіциди, біопрепарати, бур'яни, зерно.*

EVALUATION OF THE IMPACT OF CHEMICAL MEASURES ON WEED INFESTATION ANDYIELD OF WINTER WHEAT

Yu. M. Shkatula, A. O. Ratz

In the context of climate change in the direction of warming, in order to obtain a consistently high yield of winter wheat grain, it is important to apply technological measures that will increase the productivity and quality of the grown products. The development of the most effective, least costly and environmentally friendly weed control system using modern herbicides and biological products during the cultivation of winter wheat is an extremely important element in the technology of this crop. The purpose of the study. To identify the peculiarities of the formation of grain productivity of winter wheat depending on biological products and the use of herbicides in the autumn. Methods of problem analysis. The research was carried out during 2022–2023 in the experimental field of Vinnytsia National Agrarian University in the village of Agronomicheske, Vinnytsia district. The experimental work was carried out to control weeds in crops by means of chemical measures. In the course of the study, a combination of general scientific methods was used: hypothesis, observation, analysis; and special methods: laboratory and field. Indicators were processed using mathematical statistics. Analyzing the species composition of weeds, we note that in the autumn period, when the 3rd leaf of wheat appeared, there were 45 weeds per m^2. The best effect on the reduction of weeds on wheat crops was observed in areas where wheat seeds were treated with Organic-Balance biological product before sowing, and herbicide Kalibr and surfactant Trend 90 were applied in the phase of tillering. The reduction of weed vegetation in comparison with the control plots for the period of wheat harvesting showed a level of 90,8% reduction compared to the control plots, among which the number of cereal weeds decreased by 82,9%, dicotyledonous weeds – 96,2%. The average wheat yield for two years in the control plots was 2.34 t/ha. With the autumn application of the herbicide Caliber at a rate of 50 g/ha and the surfactant Trend 90, the wheat grain yield was within 4,64 t/ha, an increase over the control was 2,30 t/ha or 98%. In the areas where winter wheat seeds were treated with Organic-Balance biological product and Kalibr herbicide with Trend 90 surfactant was applied in the fall, the grain yield was 5,34 t/ha, an increase over the control was 128%. The experiments conducted. The conducted research contributes to the possibility of postponing the application of post-emergence herbicides from spring to autumn.

***Key words:** agrocenosis, wheat, herbicides, biological products, weeds, grain.*

Вступ

Пшениця озима (*Triticum aestivum L.*) є основною культурою світового землеробства за посівними площами і є беззаперечною умовою існування людства, а також визначає соціально-економічне та екологічне становище України на світовому ринку (Сахненко, 2017).

У 2018–2019 рр. зібраний врожай зерна в Україні перейшов рубіж 70 млн т. (Борзих і Круть, 2019). У світі зростає попит на продовольчу пшеницю. За статистичними даними в Україні вирощують лише 10–12% продовольчої пшениці, решта – кормова. Тому, серед головних завдань державного рівня є не лише збільшення валового виробництва пшениці, а й забезпечення зерна пшениці високими показниками якості (Осокіна та ін., 2016).

Пшениця озима характеризується унікальними властивостями зерна культури (вміст білка в межах 8–22%, наявність високоцінних вуглеводів, жирів, вітамінів, ферментів та мінеральних речовин), так і агротехнічними перевагами (цінний попередник під інші культури сівозмін, ефективне використанням опадів осінньо-зимового періоду, покращує фітосанітарний стан агроценозів (Фанін і Литвиненко, 2023).

За останні роки спостерігається різка зміна клімату в напрямі потепління, тому для науковців і виробників для отримання високих врожаїв зерна пшениці озимої важливе значення має впровадження нових сортів пшениці, які більш адаптивні до навколишнього середовища (Голик та ін., 2023), контролювання бур'янів в її посівах (Матюха, 2023), застосування інших тех-

нологічних заходів, які сприятимуть підвищенню продуктивності і якості вирощеної продукції.

Серед багатьох технологічних заходів, які забезпечують оптимальні умови для росту та розвитку рослин пшениці озимої, зменшення шкодочинних організмів і належного рівня продуктивності культури належить сівозмінам (Літвінов та ін., 2016). Попередники для пшениці озимої підбирають з урахуванням кліматичних умов регіону, наявності культур, які вирощуються в господарствах, структури посівних площ. Серед найкращих попередників для пшениці озимої є зернобобові культури та ярий і озимий ріпак.

Фітосанітарна ситуація у посівах пшениці озимої значною мірою визначає урожайність цієї культури та її стабільність. Особливу загрозу в одержанні високих і стабільних врожаїв озимини є забур'яненість її посівів та інтенсивність їх розвитку.

За поверхневого обробітку ґрунту збільшується кількість бур'янової рослинності в порівнянні з традиційною оранкою (Костогриз і Крижанівський, 2015; Бомба і Бомба, 2019). Для успішного подолання негативного впливу бур'янів на орних землях слід створити такі умови, при яких культурні рослини будуть займати максимум вільних екологічних ніш в агроценозах. Гербіциди в такій ситуації повинні бути чинником, здатним допомогти культурним рослинам завоювати домінантне становище в агроценозі, що формується (Цвей і Бондар, 2017).

У зв'язку з розвитком інтенсивних технологій сільськогосподарських культур хімічні заходи набули значного поширення, які постійно вдосконалюються. Для ефективного контролювання бур'янів у агроценозах пшениці озимої є досить велика кількість гербіцидів з різними діючими речовинами, які ефективно знищують бур'янову рослинність. Якість внесення гербіцидів чи їх бакових сумішей залежить від своєчасності проведеної обробки. Бур'яни, що залишаються в посівах пшениці озимої знаходяться в пригніченому стані і не становлять загрози агроценозам. Рослини пшениці озимої у весняний період швидко кущаться, вегетують і створюють велику листову поверхню, яка успішно конкурує з бур'янами. Завдяки сучасним гербіцидам боротьбу з бур'янами в агроценозах пшениці можна проводити від фази 3–4 листків до появи прапорцевого листка, залежно від видів та періоду появи бур'янів.

Раніше зазначено (Євтушенко і Скок, 2023), що в інтенсивних технологіях вирощування сільськогосподарських культур більшість господарств застосовують регулятори росту рослин, які в малих дозах прискорюють ріст і розвиток культурних рослин, підвищують продуктивність і якість продукції, збільшують адаптивність до стресових екологічних чинників навколишнього природного середовища.

У результаті передпосівної обробки насіння пшениці озимої препаратом Стимпо в нормі 25 мл/т стимулювала процеси розвитку та росту кореневої системи і листків пшениці, на що вказує зростання польової схожості пшениці м'якої озимої на 4–7% та коефіцієнту кущення на 20,4–38,6%, порівняно з контрольними ділянками, без обробки. Досліджено, що біопрепарат Стимпо збільшує кількість продуктивних пагонів, масу зерна в колосі, підвищує вихід товарної частини врожаю, що зокрема збільшує біологічну врожайність пшениці озимої (Колесников і Євстафіева, 2017). Поєднання передпосівної обробки біопрепаратами Хелп Рост і Азотофіт та підживлення у період кущення біопрепаратом стимулюючої дії Органік Баланс сприяло позитивному впливу на кущистість рослин пшениці та їх продуктивність. Кількість продуктивних стебел становила 580 шт/м^2, що на 102 шт/м^2 більше у порівнянні з контролем (Пінчук та ін., 2022).

Розробка найбільш ефективної, найменш економічно та екологічної системи контролювання бур'янів із використанням сучасних гербіцидів і біопрепаратів під час вирощування озимої пшениці є надзвичайно важливими елементами в технології даної культури.

Мета дослідження – виявити особливості формування зернової продуктивності озимої пшениці залежно від біопрепаратів і внесених гербіцидів в осінній період.

Матеріал і методи

Дослідження проводились на дослідному полі Вінницького національного аграрного університету с. Агрономічне Вінницького району. Ґрунт – сірий лісовий середньо-суглинковий. Агрохімічні показники є типовими для центральної зони. В дослідженнях попередником пшениці озимої був ріпак озимий. Під передпосівну культивацію вносили нітроамофоску з розрахунку 150 кг/га, ранньою весною вносилась аміачна селітра – 1,5 ц/га. Висівали у другій декаді вересня сівалкою СЗ-3,6. Норма

висіву насіння – 3,5 млн схожих насінин на 1 га. Сорт пшениці озимої іноземної селекції Етана. Гербіциди вносили в фазі кущення. Догляд за посівами складався з технологічних заходів рекомендованих в даній зоні. Облікова площа ділянок 40 м^2 при чотирьох разовій повторності. Врожай збирали малогабаритним комбайном «Сампо-500».

Експериментальну роботу виконували щодо контролювання бур'янів у посівах за рахунок проведення хімічних заходів. Гербіциди вносили ранцевим обприскувачем, норма витрати робочої рідини 250 л/га.

Схема досліджень включала: контроль (без обробки); окремо вносились гербіциди Калібр 75 в.г. + ПАР Тренд 90 в нормі внесення 50 г/га + 0,2 л/га; Стимпо + Калібр 75 в.г. + ПАР Тренд 90 в нормі внесення 25 мл/т + 50 г/га + 0,2 л/га; Органік-баланс + Калібр 75 в.г. + ПАР Тренд 90 в нормі внесення 1,5 л/т + 50 г/га + 0,2 л/га.

Польові дослідження супроводжувались наступними спостереженнями та обліками: визначення видів і чисельності бур'янів в агроценозах проводили кількісним методом після застосування хімічних заходів та у кінці вегетації рослин пшениці. Облік урожаю зерна здійснювали ваговим методом відповідно до методичних вказівок (Мойсейченко і Єщенко, 1994). Статистичну обробку даних проводили за допомогою дисперсійного аналізу (Ермантраут та ін., 2018).

Гербіцид Калібр 75 (DuPont). Препаративна форма: водні гранули. Діюча речовина: трибенурон-метил, 250 г/кг, тифенсульфурон-метил, 500 г/кг. Хімічний склад: сульфонілсечовини. Концентрація діючої речовини 500 + 250 г/кг. Норма внесення 50 г/га. Гербіцид ефективно знищує однорічні та багаторічні дводольні бур'яни. Для знищення злакових бур'янів, зокрема метлюг звичайний, рекомендується проводити обприскування гербідидом Калібр 75 у нормі 60 г/га на ранніх стадіях розвитку бур'яну. Для ефективної дії препарату бажано щоб була тепла і волого погода. Гербіцид Калібр селективний щодо рослин пшениці на стадіях 2–3-х листків до появи прапорцевого листка.

Калібр високоефективний проти видів зимуючих бур'янів та багаторічних дводольних бур'янів (осотів, хрінниця круповидна, щавель, кульбаба лікарська). Для більш ефективної дії на бур'яни, особливо за складних абіотичних умов, рекомендується додавати поверхнево активну речовину ПАР Тренд 90, з нормою внесення 90–100 мл на 100 л робочого розчину.

Стимпо – ефективний біостимулятор рослин, основна дія якого полягає в синергетичному ефекті взаємодії продуктів біохімічного культивування грибів-мікроміцетивів. Препарат рекомендовано застосовувати перед посівною, оброблюючи насіння культур, а також для обприскування. Препарат допомагає виробляти максимальний генетичний потенціал культури. Використання біостимулятора Стимпо гарантує: захист і рівномірний ріст рослин; захист від стресових факторів, кліматичних умов та захворювань; посилює симбіотичну мікрофлору в зоні кореневої системи; збільшується фотосинтетична активність. Обробка насіння – 25 мл/т.

Органік-баланс. Біопрепарат для стимуляції росту та розвитку сільсько-господарських культур. Підвищує стійкість культурних рослин до стресових абіотичних і технологічних чинників. За рахунок обробки насіння пшениці озимої біопрепаратом підвищується схожість зерна, однорідність та дружність сходів; відбувається збалансоване живлення рослин пшениці, покращуються якісні показники зерна; підвищується продуктивність посівів. Норма обробки насіння пшениці озимої перед посівом – 1,5 л/т.

Результати

Кількість бур'янів, їх види залежать від погодних умов, попередників, технології вирощування і біологічних особливостей певної культури та запасу насіння і вегетативних органів розмноження бур'янів на даному полі.

У зв'язку зі зміною клімату, що супроводжується потеплінням, спостерігаються теплі зими. За таких умов зимуючі бур'яни осінньої популяції в посівах озимої пшениці формують розетки, достатньо вкорінюються і добре перезимовують та під час відновлення вегетації формують достатньо велику сиру масу. Отже, існує проблема коригування захисту озимої пшениці від бур'янів та падалиці озимого ріпаку. З огляду на це, все більшого значення набуває раціональне використання гербіцидів з урахуванням біологічних особливостей рослин пшениці і бур'янів задля забезпечення максимально високого рівня захисної дії.

Після посіву пшениці озимої складаються сприятливі умови не тільки для культурних рослин, а й бур'янової рослинності, особливо

після попередника падалиці озимого ріпаку. Бур'янова рослинність активно росте, розвиваються і входить у зимівлю, набравши значну біомасу. Весною, коли проводять хімічний захист проти бур'янів, більшість з них активно вже використовує вологу, елементи живлення та енергію сонця. Крім цього, катастрофічно знижується ефективність підживлення рослин пшениці азотними добривами, оскільки розвинута коренева система бур'янів ефективно їх поглинає.

Критичним для контролю бур'янів восени є, як правило, ранній період росту культури, починаючи від появи проростків або сходів, під час якого бур'яни здатні конкурувати з пшеницею озимою за поживні речовини. Тому обмежувати шкідливість бур'янів слід на ранніх етапах розвитку культури. В осінній період серед біологічних груп бур'янів найбільшої шкоди посівам озимої пшениці також завдають коренепаросткові (види осотів) і зимуючі бур'яни: мак дикий, підмаренник чіпкий, талабан польовий, ромашка непахуча, сокирки польові, фіалка польова – сходи яких з'являються вже восени. Їхній розвиток збігається із періодом вегетації рослин культури.

Протягом 2022–2023 років вивчався процес формування видового складу бур'янів у агроценозах озимої пшениці в осінній період. Домінуючими засмічувачами посівів культури, як показали обліки, є падалиця ріпаку і однорічні види бур'янів.

Аналізуючи видовий склад бур'янів, відмітимо, що на ділянках в осінній період за появи 3-го листочка пшениці нараховувалось 45 шт/м^2 бур'янів. Домінуючим були однорічні дводольні бур'яни, зокрема падалиця озимого ріпаку, талабан польовий, ромашка непахуча, сокирки польові, кількість їх сягала від 4 до 10 шт/м^2. Загалом частка дводольних рослин серед бур'янів сягала в межах 86,7 % від загальної кількості. Слід відмітити інтенсивне проростання падалиці озимого ріпаку після збирання культури. Кількість падалиці ріпаку на посівах озимої пшениці в середньому була в межах 10 шт/м^2. Злакові бур'яни були представлені однодольними зимуючими рослинами метлюгом 4 шт/м^2 та курячим просом 2 шт/м^2. Серед багаторічних зустрічався поодиноко осот (табл. 1).

Рішення про проведення захисних заходів гербіцидами у посівах пшениці озимої слід приймати тільки на підставі результатів обстеження агроценозів. Проведення заходів щодо контролювання бур'янів у посівах пшениці озимої в осінній період та сприятливі кліматичні умови зимою є необхідними факторами для відновлення вегетації навесні, суттєвого підвищення продуктивності рослин пшениці. Добре розвинута озима пшениця пригнічує і перешкоджає появі та розвитку зимуючих і ярих бур'янів.

Таблиця 1
Видовий склад бур'янів агроценозу озимої пшениці в осінній період (середнє 2022–2023 рр.)

Видовий склад бур'янів	**Кількість бур'янів**	
	шт/м^2	**%**
Всього	45	100
Злаки, в т. ч.:	6	13,3
Метлюг	4	66,7
Куряче просо	2	33,3
Дводольні, в т. ч.:	39	86,7
Падалиця ріпаку	10	25,6
Талабан польовий	7	17,9
Ромашка непахуча	7	17,9
Сокирки польові	4	10,3
Мак дикий	4	10,3
Фіалка польова	3	7,7
Підмаренник чіпкий	2	5,1
Осот рожевий	1	2,6
Інші	1	2,6

Застосування гербіциду Калібр 75 в.г. у нормі витрати 50 г/га та ПАР Тренд 90 в осінній період сприяло загибелі дводольних бур'янів (особливо падалиці озимого ріпаку). Перед збиранням озимої пшениці кількість бур'янів становила 11 шт/м^2, а рівень забур'яненості зменшився у порівнянні з контролем на 87,4%. Обробка насіння пшениці озимої біопрепаратом Стимпо у нормі витрати 25 мл/т та обприскування посівів пшениці озимої гербіцидом Калібр 75 в.г. у нормі витрати 50 г/га в осінній період сприяв кращому росту і розвитку рослин озимої пшениці та значному пригніченню бур'янової рослинності. Рівень забур'яненості в порівнянні з контролем без гербіцидів та препаратів на період збирання зменшився на 89,7%, а на період збирання кількість бур'янової рослинності була на рівні 9 шт/м^2. При цьому рослини озимої пшениці мали кращий вигляд, ніж на ділянках, де вносився тільки гербіцид

Калібр. Найкраща дія щодо зменшення бур'янової рослинності на посівах пшениці відмічена на ділянках, де насіння пшениці перед посівом оброблялось біопрепаратом Органік-баланс, а у фазу початок кущення вносився гербіцид Калібр і ПАР Тренд 90. Зменшення бур'янової рослинності в порівнянні з контрольними ділянками за обліками на період збирання зерна пшениці показали рівень зниження в порівнянні з контрольними ділянками на 90,8%, серед них кількість злакових бур'янів зменшилось на 82,9%, дводольних – 96,2% (табл. 2).

Успішний захист озимої пшениці від бур'янів в осінній період дає змогу зберегти ту кількість поживних речовин, які витрачаються на формування маси бур'янів у її посівах. Передпосівна обробка насіння пшениці біопрепаратами підвищує ефективність росту і розвитку рослин пшениці озимої, кущення, оскільки елементи живлення більше засвоюються культурними рослинами. Відмічено позитивний вплив хімічного захисту проти бур'янів, що сприяло ефективному формуванню структурних елементів продуктивності озимої пшениці.

Проведені дослідження дали змогу дійти висновку, що в ґрунтово-кліматичних умовах центральної частини Вінницької області існує реальна можливість перенести застосування післясходових гербіцидів з весняного періоду на осінній, бо ж важливим є знищення бур'янів на початку їх вегетації, тобто у ранній найчутливішій фазі росту. Тому для цих умов оптимальним строком хімічної обробки посівів озимої пшениці є осінній захист післясходовими гербіцидами, який дає змогу зменшити шкодочинність бур'янів на противагу весняному, підвищує продуктивний потенціал культурних рослин пшениці. Це вказує на доцільність його застосування в системі захисту культури від бур'янів. За умови хімічного захисту восени й відсутності забур'яненості багаторічними видами та оптимальної густоти стеблостою культурних рослин використання весною післясходових гербіцидів не потрібно.

Урожайність зерна пшениці в середньому за два роки на контрольних ділянках була в межах 2,34 т/га. За осіннього внесення гербіциду Калібр в нормі витрати 50 г/га та ПАР Тренд 90 рівень урожайності зерна пшениці була в межах 4,64 т/га, приріст до контролю становив 2,30 т/га або 98%. На ділянках, де насіння озимої пшениці оброблялось біопрепаратом Органік-баланс і вносився восени гербіцид Калібр з ПАР Тренд 90 рівень урожайності зерна становив 5,34 т/га, приріст до контролю був на рівні 128% (табл. 3).

Таким чином, обробка насіння пшениці озимої біопрепаратами перед посівом та осіннє внесення післясходових гербіцидів дає змогу зменшити шкодочинність бур'янів і суттєво підвищити продуктивний потенціал рослин пшениці.

Обговорення

Серед багатьох агрономічних заходів, які сприяють підвищенню врожайності зерна пшениці озимої, належить передпосівна обробка насіння біопрепаратами та хімічний захист від шкодочинних організмів. Враховуючи тенденції зміни кліматичних умов, високого забур'янення агроценозів пшениці озимої, важливим чинником контролювання бур'янів є застосування гербіцидів в осінній період. Найефективнішими

Таблиця 2

Дія гербіцидів на забур'яненість агроценозу озимої пшениці в осінній період (середнє за 2022–2023 рр.)

Варіанти досліду	**Облік**	**Кількість бур'янів, шт/м^2**			**Загибель бур'янів, %**		
		Всьо-го	**Злак.**	**Двод.**	**Всьо-го**	**Злак.**	**Двод.**
Контроль (без обробки)	1	45*	6	39	-	-	-
	2	87*	35	52	-	-	-
Калібр 75 в.г. + ПАР Тренд 90	1	45	6	39	-	-	-
	2	11	7	4	87,4	80,0	92,3
Стимпо + Калібр 75 в.г. + ПАР Тренд 90	1	45	6	39	-	-	-
	2	9	6	3	89,7	82,9	94,2
Органік-баланс + Калібр 75 в.г. + ПАР Тренд 90	1	45	6	39	-	-	-
	2	8	6	2	90,8	82,9	96,2

Примітка: 1 – початок фази кущіння; 2 – перед збиранням урожаю.

Таблиця 3

Урожайність зерна озимої пшениці залежно від впливу біопрепаратів і гербіцидів, т/га

Варіанти внесення	**Урожайність**			**Приріст до контролю**	
	2022 р.	**2023 р.**	**середнє**	**т/га**	**%**
Контроль (без обробки)	2,21	2,47	2,34	-	-
Калібр 75 в.г. + ПАР Тренд 90	4,39	4,88	4,64	+ 2,30	98
Стимпо + Калібр 75 в.г. + ПАР Тренд 90	5,03	5,35	5,19	+ 2,85	122
Органік-баланс + Калібр 75 в.г. + ПАР Тренд 90	5,26	5,41	5,34	+ 3,00	128
$НІР_{05}$	1,2	1,1			

гербіцидами для осіннього застосування є препарати, які належать до сульфенілсечовин, які діють навіть за низьких температур і можуть застосовуватись на початкових стадіях розвитку пшениці озимої. Найкраща дія щодо зменшення бур'янової рослинності в посівах пшениці озимої відмічена на ділянках, де насіння пшениці перед посівом оброблялось біопрепаратом Органік-баланс, а у фазу початок кущення вносився гербіцид Калібр і ПАР Тренд 90. Зменшення бур'янової рослинності в порівнянні з контрольними ділянками за обліками на період збирання зерна пшениці показали рівень зниження у порівнянні з контрольними ділянками на 90,8%, а урожайність зерна досягла 5,34 т/га, приріст до контролю був на рівні 3 т/га або на 128%. Проведені дослідження обґрунтують переваги перенесенню внесення післясходових гербіцидів з весняного періоду на осінній.

Висновки

Встановлено, що на ділянках в осінній період за появи 3-го листочка пшениці нараховувалось 45 шт/м^2 бур'янів. Домінуючим були однорічні дводольні бур'яни, зокрема падалиця озимого ріпаку, талабан польовий, ромашка непахуча, сокирки польові, кількість їх рівнялась від 4 до 10 шт/м^2. Застосування гербіциду Калібр 75 в.г. у нормі витрати 50 г/га та ПАР Тренд 90 в нормі витрати 0, 2 л/га в осінній період сприяло загибелі бур'янів і падалиці ріпаку озимого. Перед збиранням озимої пшениці кількість бур'янів становила 11 шт/м^2, а рівень забур'яненості зменшився у порівнянні з контролем на 87,4%. На ділянках, де насіння озимої пшениці оброблялось біопрепаратом Органік-баланс і вносився восени гербіцид Калібр з ПАР Тренд 90 рівень урожайності зерна становив 5,34 т/га.

Список використаної літератури

Бомба М.Я., Бомба М.І. Бур'яни в агрофітоценозах та екологізація заходів щодо контролювання їх чисельності. *Вісник Уманського національного університету.* 2019. № 1. С. 15–20. https://doi.org/10.31395/2310-0478-2019-1-15-20.

Борзих О.І., Круть М.В. База даних інноваційних розробок із захисту зернових культур в Україні. *Захист і карантин рослин.* 2019. Вип. 65. С. 3–14. https://doi.org/10.36495/1606-9773.2019.65.3-16.

Голик Л.М., Поліщук С.В., Райчук Т.М., та ін. Урожайність сортів пшениці озимої та контроль спалахів хвороб на рослинах за умов зміни клімату. *Вісник аграрної науки.* 2023. № 7 (844). С. 43–52. https://doi.org/10.31073/agrovisnyk 202307-02

Ермантраут Е.Р., та ін. Методика наукових досліджень в агрономії : навч. посіб. Біла Церква, 2018. 103 с.

Євтушенко О.Т., Скок С.В. Вплив ріст регулюючих препаратів на ріст і розвиток сільськогосподарських культур. *Вісник Сумського національного аграрного університету.* 2023. Вип. 1 (51). С. 53–63. https://doi.org/10.32782/agrobio.2023.1.7.

Колесников М.А., Євстафіева К.С. Вплив біопрепарату Стимпо на процеси формування врожайності сортів пшениці озимої м'якої озимої. *Вісник Уманського національного університету садівництва.* 2017. № 2. С. 29–32.

Костогриз П.В., Крижанівський В.Г. Урожайність гороху, пшениці та буряку цукрового на фоні різних заходів основного обробітку ґрунту. *Вісник аграрної науки Причорномор'я.* 2015. Вип. 2. Том 1. Ч. 2. С. 91–98.

Літвінов Д.В., Кальчун Т.Р., Гордієнко Т.І. Короткоротаційні зернові сівозміни в органічному землеробстві. *Збірник наукових праць ННЦ "Інститут землеробства НААН".* 2016. Вип. 1. С. 16–26.

Матюха В.Л. Фітосанітарний стан посівів пшениці озимої залежно від впливу бакових сумішей пестицидів в північному Степу України. *Таврійський науковий вісник.* 2023. Вип. 129. С. 102–110. https://doi.org/ 10.32851/2226-0099.2023.129.14.

Мойсейченко В.Ф., Єщенко В.О. Основи наукових досліджень в агрономії. Київ : Вища школа, 1994. 334 с.

Осокіна Н.М., та ін. Технологія зберігання зерна з основами захисту від шкідників: навч. посіб. Київ : ТОВ. СІК ГРУП Україна. 2016. 248 с.

Пінчук Н.В., Вергелес П.М., Коваленко Т.М., Амонс С.Е. Ефективність застосування біопрепаратів в посівах пшениці озимої в умовах Правобережного Лісостепу. *Сільське господарство та лісівництво.* 2022. № 24. С. 96–113. https://doi.org/10.37128/2707-5826-2022-1-7.

Сахненко В.В. Вплив сонячного світла та розмноження шкідників пшениці озимої за NO-TILL технології в Лісостепу України. *Рослинництво та ґрунтознавство :* збірник наукових праць НУБіП, 2017. № 269. С. 272–277.

Фанін Я.С., Литвиненко М.А. Урожайність та показники якості зерна у вітчизняних і закордонних сортів озимої м'якої пшениці. *Зернові культури.* 2023. Том 7. № 1. С. 129–137. https://doi.org/10.31867/2523-4544/0268.

Цвей Я.П., Бондар С.О. Забур'яненість пшениці озимої в різноротаційних сівозмінах. *Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків.* 2017. Вип. 25. С. 101–107.

References

Bomba M.Ya., & Bomba M.I. (2019). Buriany v ahrofitotsenozakh ta ekolohizatsiia zakhodiv shchodo kontroliuvannia yikh chyselnosti [Weeds in agrophytocenoses and ecologization of measures to control their number]. *Visnyk Umanskoho natsionalnoho universytetu [Bulletin of Uman National University],* 1, 15–20. https://doi.org/10.31395/2310-0478-2019-1-15-20 [in Ukrainian].

Borzykh O.I., & Krut M.V. (2019). Baza danykh innovatsiinykh rozrobok iz zakhystu zernovykh kultur v Ukraini [Database of innovative developments for the protection of grain crops in Ukraine]. *Zakhyst i karantyn roslyn [Plant Protection and Quarantin],* 65, 3–14. https://doi.org/10.36495/1606-9773.2019.65.3-16 [in Ukrainian].

Holyk L.M., Polishchuk, S.V., & Raichuk, T.M, et al. (2023). Urozhainist sortiv pshenytsi ozymoi ta kontrol spalakhiv khvorob na roslynakh za umov zminy klimatu [Yield of winter wheat varieties and control of plant disease outbreaks under climate change], *Visnyk ahrarnoi nauky [Bulletin of Agrarian Science],* 7 (844), 43–52. https://doi.org/10.31073/agrovisnyk 202307-02 [in Ukrainian].

Ermantraut, E.R., et al. (2018). Metodyka naukovykh doslidzhen v ahronomii *[Methods of scientific research in agronomy].* navch. posib. Bila Tserkva, 103 p. [in Ukrainian].

Yevtushenko, O.T., & Skok, S.V. (2023). Vplyv rist rehuliuiuchykh preparativ na rist i rozvytok silskohospodarskykh kultur [Influence of growth regulating preparations on the growth and development of crops]. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu [Announcer of the Sumy national agrarian university],* 1 (51), 53–63. https://doi.org/10.32782/agrobio.2023.1.7 [in Ukrainian].

Kolesnykov, M.A., & Evstafyeva, K.S. (2017). Vplyv biopreparatu Stympo na protsesy formuvannia vrozhainosti sortiv pshenytsi ozymoi miakoi ozymoi [Influence of biological product Stimpo on the processes of yield formation of soft winter wheat varieties]. *Visnyk Umanskoho natsionalnoho universytetu sadivnytstva [Bulletin of Uman National University of Horticulture],* 2, 29–32 [in Ukrainian].

Kostohryz, P.V., & Kryzhanivskyi, V.H. (2015). Urozhainist horokhu, pshenytsi ta buriaku tsukrovoho na foni riznykh zakhodiv osnovnoho obrobitku hruntu [Yield of peas, wheat and sugar beet on the background of different measures of basic tillage]. *Visnyk ahrarnoi nauky Prychornomoria [Bulletin of Agrarian Science of the Black Sea Region],* 2, (1, 2), 91–98 [in Ukrainian].

Litvinov, D.V., Kalchun, T.R., & Hordiienko, T.I. (2016). Korotkorotatsiini zernovi sivozminy v orhanichnomu zemlerobstvi [Short-term grain crop rotations in organic farming]. *Zbirnyk naukovykh*

prats NNTs "Instytut zemlerobstva NAAN"[Collection of scientific papers of the Institute of Agriculture of the National Academy of Sciences of Ukraine. Issue], 1, 16–26 [in Ukrainian].

Matiukha, V.L. (2023). Fitosanitarnyi stan posiviv pshenytsi ozymoi zalezhno vid vplyvu bakovykh sumishei pestytsydiv v pivnichnomu Stepu Ukrainy [Phytosanitary condition of winter wheat crops depending on the influence of pesticide tank mixtures in the northern Steppe of Ukraine]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk [Tavrian Scientific Bulletin],* 129, 102–110. https://doi.org/10.32851/2226-0099.2023.129.14 [in Ukrainian].

Moiseichenko, V.F, & Yeshchenko V.O. (1994). Osnovy naukovykh doslidzhen v ahronomii [Fundamentals of scientific research in agronomy]. Kyiv : Vyshcha shkola. 334 p. [in Ukrainian].

Osokina, N.M., et al. (2016). Tekhnolohiia zberihannia zerna z osnovamy zakhystu vid shkidnykiv [Grain storage technology with the basics of pest protection]: navch. posib. K: TOV. SIK HRUP Ukraina. 248 p. [in Ukrainian].

Pinchuk, N.V., Verheles, P.M., Kovalenko, T.M., & Amons, S.E. (2022). Efektyvnist zastosuvannia biopreparativ v posivakh pshenytsi ozymoi v umovakh Pravoberezhnoho Lisostepu [Efficiency of biological products application in winter wheat crops in the conditions of the Right-Bank Forest-Steppe]. *Silske hospodarstvo ta lisivnytstvo [Agriculture and forestry],* 24, 96–113. https://doi.org/10.37128/2707-5826-2022-1-7 [in Ukrainian].

Sakhnenko, V.V. (2017). Vplyv soniachnoho svitla ta rozmnozhennia shkidnykiv pshenytsi ozymoi za NO-TILL tekhnolohii v Lisostepu Ukrainy [Influence of sunlight and reproduction of winter wheat pests under NO-TILL technology in the Forest-Steppe of Ukraine]. *Roslynnytstvo ta gruntoznavstvo [Crop production and soil science].* Zbirnyk naukovykh prats NUBiP, 269, 272–277 [in Ukrainian].

Fanin, Ya.S., & Lytvynenko, M.A. (2023). Urozhainist ta pokaznyky yakosti zerna u vitchyznianykh i zakordonnykh sortiv ozymoi miakoi pshenytsi [Yield and grain quality indicators in domestic and foreign varieties of winter soft wheat]. *Zernovi kultury [Cereal crops],* 7, 1, 129–137. https://doi.org/10.31867/2523-4544/0268 [in Ukrainian].

Tsvei, Ya.P., & Bondar, S.O. (2017). Zaburianenist pshenytsi ozymoi v riznorotatsiinykh sivozminakh [Weed infestation of winter wheat in diversified crop rotations]. *Naukovi pratsi Instytutu bioenerhetychnykh kultur i tsukrovykh buriakiv [Scientific works of the Institute of bioenergy crops and sugar beet. Collection of scientific works. Issue]*, 25, 101–107 [in Ukrainian].

Отримано: 27.10.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

ЕКОЛОГІЯ

УДК 502.2(477.41-751.3)
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.19

ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНИЙ ФОНД КИЇВЩИНИ ЯК СКЛАДОВА НАЦІОНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОЇ МЕРЕЖІ

Ю. О. Бондар[1], О. А. Марченко[2], І. А. Діденко[3], С. О. Пустова[4]

Стаття присвячена аналізу структури та функціонування природно-заповідного фонду Київщини, його значенню для забезпечення екологічної стабільності регіону та внеску в національну екологічну мережу. У дослідженні висвітлюються ключові категорії територій та об'єктів природно-заповідного фонду, такі як національні природні парки, біосферні та природні заповідники, заказники, пам'ятки природи, ботанічні сади та інші форми природоохоронних зон. Природно-заповідний фонд Київської області є невід'ємною частиною Національної системи екологічної мережі України, що відіграє важливу роль у збереженні біорізноманіття та екосистемних послуг. Ключовою темою є інтеграція природоохоронних об'єктів Київщини у ширший контекст екологічної мережі України, а також їхнє функціонування як важливих екологічних осередків, що забезпечують зв'язок між різними екосистемами, зокрема лісовими, водними та степовими. Підкреслюється роль природоохоронних територій у збереженні рідкісних видів флори і фауни, а також їхній потенціал для підтримки міграції видів через екологічні коридори.
У статті також обговорюються виклики, з якими стикається природно-заповідний фонд Київської області, включаючи антропогенний тиск, урбанізацію та зміни клімату. Пропонуються шляхи покращення управління цими територіями через удосконалення законодавчих механізмів, моніторингу та залучення громадськості. Автори підкреслюють значущість природно-заповід-

[1] кандидат біологічних наук, доцент,
завідувач кафедри екології та ландшафтного дизайну
(Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет», м. Київ)
e-mail: juliya.bondar@e-u.edu.ua
ORCID: 0009-0002-8568-6541
[2] кандидат біологічних наук,
доцент кафедри екології та ландшафтного дизайну
(Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет», м. Київ)
e-mail: olha.marchenko@e-u.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2419-4191
[3] кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри екології та ландшафтного дизайну
(Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет», м. Київ)
e-mail: ihor.didenko@e-u.edu.ua
ORCID: 0000-0002-8070-3501
[4] аспірант кафедри педагогіки
(Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет», м. Київ)
e-mail: svitlana.pustova@e-u.edu.ua
ORCID: 0000-0002-3768-2397

ного фонду та його внеску у забезпечення сталого розвитку регіону. Природно-заповідний фонд Київщини виконує стратегічну функцію не лише на рівні регіону, але й у загальнодержавному контексті, виступаючи однією з ключових складових національної екологічної мережі, що сприяє підтримці екологічної рівноваги та біологічного різноманіття України.

Ключові слова: *екомережа, природно-заповідний фонд, біорізноманіття, Київщина.*

THE NATURE RESERVE FUND OF THE KYIV REGION AS A COMPONENT OF THE NATIONAL ECOLOGICAL NETWORK SYSTEM

Yu. O. Bondar, O. A. Marchenko, I. A. Didenko, S. O. Pustova

The article is dedicated to analyzing the structure and functioning of the Kyiv Region's nature reserve fund, its importance for ensuring the region's ecological stability, and its contribution to the national ecological network. The study highlights the key categories of areas and objects within the nature reserve fund, such as national natural parks, biosphere and nature reserves, wildlife sanctuaries, natural landmarks, botanical gardens, and other forms of conservation areas. The nature reserve fund of Kyiv Region is an integral part of Ukraine's National Ecological Network, playing a significant role in preserving biodiversity and ecosystem services.A key topic of the research is the integration of Kyiv's conservation areas into the broader context of Ukraine's ecological network, as well as their role as vital ecological hubs that ensure the connection between various ecosystems, including forest, aquatic, and steppe systems. The role of these protected areas in preserving rare species of flora and fauna, as well as their potential to support species migration through ecological corridors, is emphasized.
The article also discusses the challenges faced by the Kyiv Region's nature reserve fund, including anthropogenic pressure, urbanization, and climate change. It proposes ways to improve the management of these areas by enhancing legal frameworks, monitoring systems, and public engagement. The authors underscore the importance of the nature reserve fund and its contribution to sustainable regional development. The Kyiv Region's nature reserve fund plays a strategic role not only at the regional level but also in the national context, acting as a key component of the national ecological network that supports ecological balance and biodiversity conservation across Ukraine.

Key words*: ecological network, nature reserve fund, biodiversity, Kyiv region.*

Вступ

Один із основних викликів сьогодення полягає в стрімкому скороченні біорізноманіття та різноманітності ландшафтів. Ця проблема набуває особливої гостроти в Європі через високу щільність населення та активну індустріалізацію. Для вирішення цієї проблеми була розроблена сучасна концепція захисту біорізноманіття та ландшафтного різноманіття в межах Європи, що отримала назву Пан'європейська екологічна мережа. Україна, будучи частиною європейської спільноти, приєдналася до цієї ініціативи, започаткувавши формування власної національної екологічної мережі (Теслович і Кричевська, 2021).

Екологічна мережа Київської області становить важливий елемент української екологічної системи, забезпечуючи збереження біорізноманіття регіону. Ця мережа створює сприятливі умови для існування та розвитку багатьох видів флори та фауни. Формування екологічних коридорів і захист природних екосистем сприяють не лише збереженню, але й відновленню природних ресурсів, що є основою для сталого розвитку цього регіону (Горошкова та ін., 2019).

Актуальність даної теми дослідження визначається значенням, що має екологічна мережа для збереження ландшафтного та біологічного різноманіття Київщини, забезпечення збалансованого природокористування, збереження природного біорізноманіття, особливо в сучасних умовах на тлі загострення екологічної, економічної і військово-політичної ситуації в Україні.

Метою даної роботи є визначення сучасного стану, значення та перспектив розвитку екологічної мережі Київської області як складової національної екологічної системи, а також її роль у збереженні ландшафтного та біологічного різноманіття регіону.

Завдання дослідження були наступними: проаналізувати сучасний стан екологічної мережі Київської області та її ключові компоненти; визначити роль екологічної мережі у збереженні біологічного та ландшафтного різноманіття регіону; дослідити основні проблеми, що перешкоджають ефективному функціонуванню екологічної мережі; оцінити ефективність реалізації екологічних ініціатив та програм, спрямованих на вирішення зазначених проблем.

Матеріал та методи

Збереження біологічного та ландшафтного різноманіття Київської області є важливим завданням для підтримки екологічної стійкості та сталого розвитку регіону. Київщина славиться своєю природною різноманітністю, яка охоплює різні типи ландшафтів, від лісів і луків до водно-болотних угідь, що сприяє існуванню багатої флори і фауни.

Основним методом захисту біологічного різноманіття є створення та розвиток природоохоронних територій, які забезпечують збереження рідкісних видів і їхніх природних середовищ. На території області існують численні заповідники та заказники, які відіграють ключову роль у збереженні унікальних екосистем. Особливо важливими є заплавні ліси та вологі угруповання, які слугують оселищем для багатьох видів птахів та інших тварин, забезпечуючи їм необхідні умови для гніздування та життя. Такі заходи сприяють не лише збереженню біорізноманіття, але й підвищенню екологічної стійкості регіону в умовах глобальних змін клімату.

У ході роботи було використано різноманітні методи дослідження. Аналізуючи літературу та документи, було розглянуто нормативно-правові акти, міжнародні угоди, наукові праці та статистичні дані, пов'язані із природно-заповідним фондом. Метод порівняння дав змогу оцінити та порівняти стан природно-заповідного фонду Київщини з іншими регіонами України, європейськими аналогами, щоб виявити унікальні особливості та проблеми. Екологічний моніторинг сприятив оцінці сучасного стану біорізноманіття, ландшафтів і природних екосистем у межах природно-заповідного фонду. Метод прогнозування дозволив оцінити перспективи розвитку природно-заповідного фонду Київщини та можливості вдосконалення його функціонування в контексті інтеграції до європейської екологічної мережі. Логіко-системний метод використовувався під час заключного етапу, для формулювання логічно обґрунтованих висновків згідно покладених завдань, аналізу даних та послідовного викладення матеріалу дослідження (Закон України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року», 2019).

Результати та обговорення

Згідно із Законом України «Про екологічну мережу», до основних структурних елементів екологічної мережі включаються наступні категорії територій:

– Природно-заповідний фонд: об'єкти, що охороняються державою для збереження унікальних природних комплексів і видів.

– Землі водного фонду: включають водні об'єкти, водно-болотні угіддя та водоохоронні зони, які забезпечують підтримку водних ресурсів та їх екосистем.

– Землі лісового фонду: ліси, що є важливими для збереження біорізноманіття, регулювання клімату та захисту ґрунтів.

– Полезахисні лісові смуги та інші захисні насадження, що зменшують ерозію ґрунтів і створюють сприятливі умови для сільськогосподарського виробництва.

– Землі оздоровчого і рекреаційного призначення: території, що використовуються для відпочинку, рекреації та лікування.

– Місця проживання рідкісних видів: це території, на яких постійно мешкають або зростають види тварин і рослин, занесені до Червоної книги України та міжнародних природоохоронних списків (Про екологічну …, 2004).

Київська область розташована в басейні середньої течії Дніпра, більшою частиною на Правобережжі. Дана територія відзначається високими показниками наукової цінності щодо біорізноманіття. У межах цієї території виникає актуальна проблема збереження біорізноманіття на різних рівнях, таких як індивідуальний, популяційний, ценотичний та ландшафтний (Екологічний …, 2022).

Для вирішення цих проблем вживаються заходи, включаючи складання червоних списків, ініціювання оптимізації місцевих (на рівні адміністративних районів) природно-заповідних мереж, а також розроблення проєкту регіональної екомережі, що вписується в загальний контекст національного проєктування екомережі (Регіональна …, 2017).

Розширення територій природно-заповідного фонду Київської області залишається одним із пріоритетних напрямків роботи Департаменту екології та природних ресурсів Київської обласної державної адміністрації. Важливо зазначити, що департамент постійно проводить активні заходи зі створення нових природоохоронних територій та об'єктів, що дозволяє зберігати унікальні природні комплекси регіону. Це сприяє не лише захисту екосистем Київщини, але й підвищенню загального

рівня природоохоронних земель у регіоні та Україні в цілому. Збільшення площ природно-заповідних територій є стратегічно важливим для збереження біорізноманіття, оскільки дозволяє забезпечити охорону рідкісних видів рослин і тварин, а також створює сприятливі умови для розвитку екологічних коридорів (Ващишин, 2020).

Додатково, розроблення проєкту регіональної екомережі відображає стратегічний підхід щодо управління природними ресурсами. Даний проєкт вписується до загального контексту національного проєктування екомережі, що свідчить про забезпечення системності та координації зусиль на рівні всієї країни для збереження природного середовища.

Природно-заповідний фонд Київщини (за межами Зони відчуження) є критично малим та вкрай незбалансованим відносно розподілу територій, які охороняються за типами зональних біотопів, що представлені в області. Приблизно половина території області знаходиться в межах зони Полісся, а друга половина – у Лісостеповій зоні, область розсічена вздовж потужною водною артерією – Дніпром, з двома великими водосховищами – Київським та Канівським, але, незважаючи на значну частку нелісових територій області, переважна частина територій ПЗФ представлена саме лісами. Представленість степових біотопів у складі наявних територій ПЗФ є замалою, з понад двохсот об'єктів ПЗФ вони представлені лише у складі 20 об'єктів (у т.ч. 6 мають дуже малу площу), а 5 з них створені ще у 2010 році. Тож ландшафтний склад ПЗФ не репрезентує ані збереженість цих ландшафтів у складі природних зон та області в цілому, ані характерні для природної зони ландшафти, які є показником еклектичності вибору земель з метою заповідання та відсутності генеральної стратегії розбудови ПЗФ.

Природно-заповідний фонд Київської області представлений вісьмома категоріями, до яких належать: біосферний заповідник, національні природні парки, регіональні ландшафтні парки, заказники, парки-пам'ятки, заповідні урочища, дендрологічні парки та парки-пам'ятки садово-паркового мистецтва. Серед найбільш вагомих об'єктів варто виокремити біосферний заповідник «Чорнобильський радіаційно-екологічний», який є однією з найвищих категорій за значенням та статусом охорони. Крім нього, до цієї ж категорії входять два національні природні парки – «Залісся» та «Білоозерський», які також відіграють ключову роль у збереженні унікальних екосистем регіону (Екологічний …, 2022).

Чорнобильський радіаційно-екологічний біосферний заповідник – це єдиний на сьогодні заповідник з природоохоронною територією у світі, що розташована в радіаційно забрудненому районі. Заповідник займає дві третини від усієї площі зони відчуження. Утворений ще у 2016 році для збереження флори та фауни зони Полісся, реабілітації забруднених радіонуклідами територій, стабілізації гідрологічного режиму, а також проведення наукових досліджень у галузі охорони природи й екології. Через 30 років після аварії на ЧАЕС природа регіону повністю відновила свій потенціал. Відсутність людини або будь-якої господарської діяльності сприяла відновленню популяцій рідкісних тварин, утворенню нових лісів. Зараз тут можна зустріти велика кількість червонокнижних видів: флори – 61, фауни – 66. З тварин постійними мешканцями є вовк, рись, лось, зубр, кінь Пржевальського, а останнім часом можна зустріти й бурого ведмедя (Чорнобильський …, 2019).

У екомережі зони Полісся (та її Київської частини) НПП «Залісся» входить до складу Дніпровсько-Деснянської ключової території загальнодержавного значення. Така ключова територія репрезентує заплавні комплекси Подесіння та екосистеми Українського Полісся (Коломійчук і Шиндер, 2024).

Ця ключова територія розташована на лівобережжі Київського водосховища в північній частині Київщини і включає прибережні комплекси лівого берега Київського водосховища, межиріччя Дніпра та Десни, заплаву річки Десна, а також притерасні ліси регіону Подесіння. Вона частково входить до складу Дніпровського екологічного коридору, що має європейське значення, а також до Деснянського екологічного коридору, який є важливим на міжрегіональному та міждержавному рівнях. На північ від цієї ключової території розташований регіональний ландшафтний парк «Міжрічинський» (запроєктований національний природний парк «Дніпровсько-Деснянський»), що є стратегічною територією екологічної мережі Чернігівської області. Саме в межах Дніпровсько-Деснянської ключової зони відбувається поділ Дніпровського та Деснянського екологічних коридорів на два окремі маршрути, що підкреслює її важливість як міжрегіональної зони в межах Східного Полісся.

Ця ключова територія належить до Чернігівсько-Новгород-Сіверського (Східнополіського) геоботанічного округу, що охоплює частину Українського Полісся на схід від Дніпра до кордону з російською федерацією. Округ вирізняється значним рівнем залісненості (35–40%) та вагомою участю у формуванні рослинного покриву заплавних лук. Переважаючі типи лісів – це дубово-соснові та соснові угруповання. Найбільші площі займають типові, торф'янисті та болотисті луки, а також осокові евтрофні болота. В межах цього округу виділяють вісім геоботанічних районів. Рослинність округу демонструє вплив Лісостепу, причому межа між лісовою та лісостеповою зонами на лівобережній частині Київського Полісся є невиразною (Концепція ..., 2004).

Заказники Київської області характеризуються найбільшою кількістю – 108 шт. або 45,4% від загальної кількості природоохоронних територій регіону.

Так, ландшафтні заказники складають 39,8% від загальної кількості, ботанічні – 19,4%, лісові та гідрологічні по 14,8%, орнітологічні – 8%, загальнозоологічні та іхтіологічні по 1,85%. Частка пам'яток природи становить 38,2% або 91 шт. Переважають ботанічні пам'ятки природи – 85,5%, комплексні – 6,7%, геологічні – 5,5% та гідрологічні – 4,4%. Аналіз наступних категорій свідчить, що частка наявності для заповідних урочищ становить – 6,7%, для парків-пам'яток садово-паркового мистецтва – 6,3%, для регіональних ландшафтних парків – 1,68% та 0,4% для дендрологічних парків.

Станом на сьогодні, на території Київської області розташовано 247 природно-заповідних територій та об'єктів, об'єднаних загальною площею 292,7 тис. гектарів. Ця площа складає 10,41% від усієї території області (табл. 1).

Для реалізації державної політики в галузі заповідної справи на Київщині та забезпечення ефективної охорони природно-заповідних територій розроблена Програма охорони довкілля та раціонального використання природних ресурсів Київської області на період 2019–2022 років. Програма спрямована на захист біорізноманіття, збереження унікальних природних комплексів і ландшафтної різноманітності регіону, враховуючи екологічну ситуацію та потребу в посиленні охорони цінних територій.

Зокрема, у 2021 році в рамках програми було виконано комплекс заходів, спрямованих на покращення інфраструктури природоохоронних об'єктів. Було встановлено 18 охоронних знаків на дев'яти об'єктах природно-заповідного фонду місцевого значення, що дозволяє чітко окреслити межі цих територій і попередити несанкціоноване використання ресурсів. Крім того, розроблено шість проєктів землеустрою для визначення меж територій природно-заповідного фонду на загальній площі 4,5 тисячі гектарів, що дає змогу посилити контроль і сприяти збереженню біорізноманіття на цих територіях.

Особливу увагу приділено збереженню унікальних природних об'єктів, як-от парк-пам'ятка садово-паркового мистецтва «Зелена брама». Було створено проєкт утримання та організації цього парку, що сприяє його розвитку як місця для рекреації та збереження природного середовища. Важливим досягненням також є випуск популярного атласу територій та об'єктів ПЗФ Київщини, який не лише інформує про цінні природні об'єкти, але й підвищує екологічну свідомість населення, сприяє залученню громадськості до питання збереження природи регіону.

Департамент екології та природних ресурсів Київської обласної державної адміністрації активно працює над збільшенням площі природно-заповідного фонду. Розробка нових природоохоронних територій та об'єктів дає можливість не лише зберегти природні ландшафти, але й забезпечити сталий розвиток, враховуючи екологічні потреби Київщини. Створення нових об'єктів ПЗФ сприяє збільшенню частки природоохоронних земель в області, що позитивно впливає на екосистему регіону та є важливим кроком до досягнення національних цілей охорони довкілля.

Науковці наголошують на необхідності комплексного підходу до охорони природи, який включає не лише розширення заповідних територій, але й удосконалення підходів до їхнього менеджменту та інтеграції в національну екологічну мережу. Вчені зазначають, що основою успішної стратегії в цьому напрямку має бути системний моніторинг і регулярний аналіз екологічного стану територій, що дозволяє оцінити ефективність впроваджених заходів та вчасно виявити загрози для біорізноманіття (Кравченко, 2017).

На думку багатьох дослідників, ключова роль природно-заповідних об'єктів полягає в збереженні біорізноманіття та регу-

Таблиця 1

Структура та динаміка природно-заповідного фонду Київської області

Категорії територій та об'єктів ПЗФ		**Роки**				
		2018	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**
Біосферні заповідники	Кількість, од.	1	1	1	1	1
	Площа, га	226964,7	226964,7	226964,7	226964,7	226964,7
Національні природні парки	Кількість, од.	2	2	2	2	2
	Площа, га	17206,7	17206,7	17206,7	17206,7	17206,7
Регіональні ландшафтні парки	Кількість, од.	3	4	4	4	4
	Площа, га	5623	5754,5	5754,5	5754,5	5754,5
Заказники місцевого значення	Кількість, од.	86	89	90	92	96
	Площа, га	26416,2	27842,5	28093,0	27999,9	28150,6
Пам'ятки природи загальнодержавного значення	Кількість, од.	2	2	2	2	2
	Площа, га	92,0	92,0	92,0	92,0	92,0
Пам'ятки природи місцевого значення	Кількість, од.	72	80	85	89	91
	Площа, га	365,6	366,0	366,1	367,2	384,1
Заповідні урочища	Кількість, од.	17	17	17	16	18
	Площа, га	1571,7	1571,7	1571,7	1535,1	1542,1
Дендрологічні парки загальнодержавного значення	Кількість, од.	1	1	1	1	1
	Площа, га	405,8	405,8	405,8	405,8	405,8
Парки-пам'ятки садово-паркового мистецтва загальнодержавного значення	Кількість, од.	3	3	3	3	3
	Площа, га	488,5	488,5	488,5	488,5	488,5
Парки-пам'ятки садово-паркового мистецтва місцевого значення	Кількість, од.	11	11	11	12	13
	Площа, га	185,8	185,8	185,8	215,8	307,6
Разом	Кількість, од.	214	226	232	238	247
	Площа, га	290726,8	293206,1	293206,1	292439,6	292706,1

люванні кліматичних процесів у регіоні. Дослідження з екологічного менеджменту показують, що природні екосистеми, включаючи ліси та водно-болотні угіддя, мають здатність до саморегуляції, але антропогенний вплив часто призводить до руйнування цих механізмів. Фахівці з екологічної економіки зазначають, що ефективне управління природними ресурсами має базуватися на принципах економічної мотивації та включати механізми екологічного оподаткування або субсидій для бізнесу та громадян, що беруть участь у збереженні навколишнього середовища (Udovychenko, 2017).

У світлі змін клімату та зростаючого антропогенного тиску, що призводять до деградації екосистем, зростає важливість впровадження принципів сталого розвитку у регіональну політику та економічну діяльність. Ефективний захист природних територій не можливий без впровадження міждисциплінарного підходу, де окрім екологів залучаються економісти, соціологи та фахівці з права. Саме така співпраця дозволить створити комплексну систему управління природно-заповідним фондом, що відповідає сучасним викликам (Сербов, 2021).

Системне та інтегроване управління природно-заповідним фондом є ключовим елементом збереження екологічної стабільності регіону. Завдяки успішній реалізації Програми охорони довкілля на Київщині, можливо значно зміцнити екологічну безпеку, сприяти збереженню біорізноманіття та створити умови для сталого розвитку, які враховують інтереси як природи, так і місцевої громади.

Нерівномірність просторового розподілу об'єктів природно-заповідного фонду частково зумовлена природним районуванням області, що відображає особливості кожного природно-географічного регіону і його значення для збереження біотичної та ландшафтної різноманітності. Однак, важливо зазначити, що території та об'єкти ПЗФ Київської області не завжди відповідають

критеріям регіональної репрезентативності. Це означає, що їх просторову структуру необхідно вдосконалювати для забезпечення більш рівномірного охоплення ключових екосистем.

Зокрема, з 106 об'єктів ПЗФ області значна частка належить до так званих «точкових» об'єктів (наприклад, окремі дерева або геологічні утворення), які, хоча й важливі в контексті культурної чи наукової цінності, не роблять істотного внеску у збереження біорізноманіття або ландшафтної різноманітності. Такі об'єкти, навіть не займаючи значну площу, можуть створювати «кількісний фон», що впливає на загальну оцінку функціональності ПЗФ у контексті регіональної екомережі, але не завжди позитивно.

Висновки

Природно-заповідний фонд Київської області є незбалансованим щодо представлення зональних біотопів, зокрема степові біотопи охоплюють лише незначну частину об'єктів ПЗФ, що не відповідає природній зональності регіону. Основну частину територій ПЗФ займають ліси, тоді як степові ландшафти представлені мінімально, що свідчить про відсутність стратегічного підходу до розбудови заповідного фонду. Наявні об'єкти ПЗФ, попри їх вагоме значення, не повною мірою репрезентують різноманітність природних зон області, потребуючи системного розширення та оптимізації.

Розвиток та розширення природно-заповідного фонду Київщини вимагає цілеспрямованих заходів, серед яких створення нових заповідних територій і об'єктів із врахуванням природно-географічних особливостей регіону. Важливим є проведення систематичних досліджень для оцінки стану біорізноманіття, ландшафтів та екосистем області, що дозволить виявити території, які потребують охорони. Особливе значення має створення та розвиток екологічних коридорів, які забезпечують зв'язок між заповідними зонами, сприяючи міграції видів та збереженню генетичного різноманіття. Це покращує життєздатність популяцій і стійкість екосистем, що особливо важливо для адаптації до кліматичних і антропогенних змін.

Список використаної літератури

Ващишин М. Відновлювані території у складі національної екомережі. *Екологічне право.* 2020. № 8. С. 120–125. https://doi.org/10.32849/2663-5313/2020.8.19.

Горошкова Л.А., Хлобистов Є.В., Трофимчук В.О. Взаємозв'язок економічного зростання та асиміляційного потенціалу довкілля у забезпеченні сталого розвитку національного господарства. *Управління проектами та розвиток виробництва.* 2019. № 1 (69). С. 24–37.

Екологічний паспорт Київської області 2022 рік [Електронний ресурс]. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/04/Ekologichnyj-pasport-Kyyivska-oblast.pdf (дата звернення 10.10.2024).

Закон України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» [Електронний ресурс]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text (дата звернення 10.10.2024).

Закон України «Про природно-заповідний фонд України» [Електронний ресурс]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/cgibin/laws/main.cgi?nreg=2456-12#Text (дата звернення 10.10.2024).

Коломійчук В.П., Шиндер О.І. Флора Національного природного парку «Залісся» : монографія. Київ, 2024. 95 с.

Концепція Загальнодержавної програми збереження біорізноманіття на 2005–2025 роки [Електронний ресурс]. URL: http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/675-2004 (дата звернення 10.10.2024).

Костюшин В.А. Екологічна мережа у Київській області [Електронний ресурс]. URL: https://pryroda.in.ua/kyiv-region/ekolohichna-merezha-u-kyyivskiy-oblasti/ (дата звернення 10.10.2024).

Кравченко О. Правовий режим природно-заповідного фонду України: історія формування, юридичні аспекти та закордонний досвід : посібник. Львів, 2017. 92 с.

Про екологічну мережу України: Закон України №1864 від 24.06.2004. [Електронний ресурс]. URL: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1864-15 (дата звернення 10.10.2024).

Регіональна програма розвитку природно-заповідного фонду Київської області «Київщина заповідна» на 2017–2020 роки (науково-практичний коментар). Київ : UNCG, 2017. 36 с.

Сербов М.Г. Формування соціо-еколого-економічної системи прісноводних ресурсів: регіональні особливості та завдання управління : монографія. Миколаїв, 2021. 356 с.

Теслович М.В., Кричевська Д.А. Історичні та геопросторові аспекти формування екомережі Закарпатської області. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія».* 2021. Вип. 55. С. 299–317. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-22.

Чорнобильський радіаційно-екологічний біосферний заповідник [Електронний ресурс]. URL: https://www.nationalparks.in.ua/zapovidnyky/biosferni/chornobilskiy/ (дата звернення 10.10.2024).

Udovychenko V.V. Nature reserve fund of the left-bank Ukraine territory as the basis for the region ecological network development. *Ukr. geogr. z.* 2017. P. 38–47 https://doi.org/10.15407/ugz2017.01.038.

References

Vashchyshyn, M. (2020). Vidnovliuvalni terytorii u skladi natsionalnoi ekomerezhi [Restored Territories in the Structure of the National Ecological Network]. *Ekologichne Pravo [Ecological Law],* 8, 120–125. https://doi.org/10.32849/2663-5313/2020.8.19 [in Ukrainian].

Goroshkova, L.A., Khlobystov, Y.V., & Trofymchuk, V.O. (2019). Vzayemozviazok ekonomichnoho zrostannia ta asymiliatsiinoho potentsialu dovkillia u zabezpechenni staloho rozvytku natsionalnoho hospodarstva [Interrelation of Economic Growth and Environmental *Assimilative Potential in Ensuring Sustainable Development of the National Economy]. Upravlinnia proektamy ta rozvytok vyrobnytstva* [*Project Management and Production Development],* 1 (69), 24–37 [in Ukrainian].

Ekolohichnyi pasport Kyivskoi oblasti 2022 rik [Ecological Passport of Kyiv Region 2022]. [Electronic resource] URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/04/Ekologichnyj-pasport-Kyyivska-oblast.pdf (access date 10.10.2024) [in Ukrainian].

Zakon Ukrainy «Pro osnovni zasady (stratehiiu) derzhavnoi ekolohichnoi polityky Ukrainy na period do 2030 roku» [Law of Ukraine «On the Fundamental Principles (Strategy) of State Environmental Policy of Ukraine until 2030»]. [Electronic resource] URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text (access date 10.10.2024) [in Ukrainian].

Zakon Ukrainy «Pro pryrodno-zapovidnyi fond Ukrainy» [Law of Ukraine «On the Natural Reserve Fund of Ukraine»]. [Electronic resource] URL: https://zakon.rada.gov.ua/cgibin/laws/main.cgi?nreg=2456-12#Text (access date 10.10.2024) [in Ukrainian].

Kolomiichuk, V.P., & Shynder, O.I. (2024). Flora Natsionalnoho pryrodnoho parku «Zalissia»: monohrafiia [Flora of the National Natural Park «Zalissia» : Monograph]. Kyiv, 95 pp [in Ukrainian].

Kontseptsiia Zahalnoderzhavnoi prohramy zberezhennia bioriznomanittia na 2005–2025 roky [Concept of the Nationwide Program for the Conservation of Biodiversity for 2005–2025]. [Electronic resource] URL: http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/675-2004 (access date 10.10.2024) [in Ukrainian].

Kostyushyn, V.A. Ekolohichna merezha u Kyivskii oblasti [Ecological Network in Kyiv Region]. [Electronic resource] URL: https://pryroda.in.ua/kyiv-region/ekolohichna-merezha-u-kyyivskiy-oblasti/ (access date 10.10.2024) [in Ukrainian].

Kravchenko, O. (2017). Pravovyi rezhym pryrodno-zapovidnoho fondu Ukrainy: istoriia formuvannia, yurydychni aspekty ta zakordonnyi dosvid: posibnyk [Legal Regime of the Natural Reserve Fund of Ukraine: History of Formation, Legal Aspects, and Foreign Experience: A Guide]. Lviv, 92 p. [in Ukrainian].

Pro ekolohichnu merezhu Ukrainy: Zakon Ukrainy No1864 vid 24.06.2004 [On the Ecological Network of Ukraine: Law of Ukraine No.1864 from June 24, 2004]. [Electronic resource] URL: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1864-15 (access date 10.10.2024) [in Ukrainian].

Rehionalna prohrama rozvytku pryrodno-zapovidnoho fondu Kyivskoi oblasti «Kyivshchyna zapovidna» na 2017–2020 roky (naukovo-praktychnyi komentar) [Regional Program for the Development of the Nature Reserve Fund of Kyiv Region «Kyiv Protected» for 2017–2020 (Scientific-Practical Commentary)]. Kyiv: UNCG, 2017. 36 pp [in Ukrainian].

Serbov, M.H. (2021). Formuvannia sotsio-ekoloho-ekonomichnoi systemy prisnovodnykh resursiv: rehionalni osoblyvosti ta zavdannia upravlinnia : monohrafiia [Formation of the Socio-Ecological-Economic System of Freshwater Resources: Regional Features and Management Tasks : Monograph]. Mykolaiv, 356 p. [in Ukrainian].

Teslovych, M.V., & Krychevska, D.A. (2021). Istorychni ta heohrafichni aspekty formuvannia ekomerezhi Zakarpatskoi oblasti [Historical and Geospatial Aspects of the Formation of the Ecological Network of Zakarpattia Region]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V. N. Karazina. Seria «Heolohiya. Heohrafiya. Ekolohiya» [Bulletin of Kharkiv NationalN. Karazin Kharkiv National University. Series «Geology. Geography. Ecology»],* 55, 299–317. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-22 [in Ukrainian].

Chornobylskyi radiatsiino-ekolohichnyi biosfernyi zapovidnyk [Chornobyl Radiation and Ecological Biosphere Reserve]. [Electronic resource] URL: https://www.nationalparks.in.ua/zapovidnyky/biosferni/chornobilskiy/ (access date 10.10.2024) [in Ukrainian].

Udovychenko, V.V. (2017). Nature reserve fund of the left-bank Ukraine territory as the basis for the region ecological network development. *Ukr. geogr. z.,* 38–47. https://doi.org/10.15407/ugz2017.01.038 [in English].

Отримано: 18.10.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

УДК 230.111.66:631.115.006
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.20

СІЛЬСЬКІ СЕЛІТЕБНІ ТЕРИТОРІЇ ЯК ОБ'ЄКТ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ: ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Р. А. Валерко[1], Л. О. Герасимчук[2], Л. Д. Романчук[3]

Сільські території є ключовим компонентом соціально-економічного та екологічного розвитку суспільства. Вони забезпечують продовольчу безпеку, збереження природного середовища, культурну спадщину та сталий розвиток. Однак, виклики, пов'язані зі зменшенням населення, урбанізацією, змінами у сільськогосподарській діяльності та кліматичними змінами, обумовлюють необхідність систематизації знань про ці території та застосування комплексного підходу до їх дослідження.

Для аналізу наукових публікацій використано програму VOSviewer та базу даних PubMed. Пошук здійснювався за ключовим виразом «rural settlements». Огляд включав рецензовані статті журналів за період з 1924 по 2024 роки. Загальна кількість знайдених публікацій склала 990 статей, із яких пік наукової активності припав на 2022 рік. Аналіз за допомогою VOSviewer виявив ключові напрями досліджень, що охоплюють: демографічні питання та особливості сільського населення; екологічні виклики: забруднення повітря, зміна клімату, проблеми водопостачання та управління відходами; соціально-економічні аспекти: нерівність, бідність, необхідність державної підтримки; продовольчу безпеку та стале функціонування сільськогосподарської діяльності.

Дослідження демонструє міждисциплінарний підхід до вивчення сільських територій, акцентуючи увагу на їх багатофункціональності та важливості для національної політики. Отримані результати є основою для розробки стратегій сталого розвитку, подолання соціально-економічної нерівності та мінімізації екологічних ризиків. Практична цінність полягає у можливості застосування отриманих даних для розробки державних програм із відродження сільської місцевості, підвищення якості життя населення та ефективного управління ресурсами.

Сільські території охоплюють значну частину площі України (84,6%) та відіграють ключову роль у забезпеченні продовольчої та екологічної безпеки країни. Проте, їх кризовий стан вимагає комп-

[1] 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
[2] 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
[3] доктор сільськогосподарських наук, професор кафедри екології та природоохоронних технологій (Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир)
e-mail: ludmilaromanchuck14@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4790-8414

лексних системних досліджень, інтеграції сучасних методів управління та залучення державних інструментів стимулювання розвитку.

Ключові слова: *сільська місцевість, сталий розвиток, екологічні проблеми, демографічна ситуація, якість життя.*

RURAL RESIDENTIAL AREAS AS AN OBJECT OF SCIENTIFIC RESEARCH: A LITERATURE REVIEW

R. A. Valerko, L. O. Herasymchuk, L. D. Romanchuk

Rural areas are a crucial component of socio-economic and environmental development. They play a key role in ensuring food security, preserving the natural environment, cultural heritage, and promoting sustainable development. However, challenges such as population decline, urbanization, changes in agricultural practices, and climate change highlight the need for systematic studies and an integrated approach to understanding these territories.
The aim of the study is to identify the main theoretical and methodological approaches to studying rural areas, to highlight key scientific trends, and to determine existing research gaps requiring further investigation.
The analysis of scientific publications was conducted using the VOSviewer program and the PubMed database. The search was performed using the keyword "rural settlements" and included peer-reviewed journal articles published between 1924 and 2024.
A total of 990 articles were identified, with the peak of scientific activity observed in 2022. Analysis using VOSviewer revealed key research directions, including: demographic issues and population specifics in rural areas; environmental challenges: air pollution, climate change, water supply issues, and waste management; socio-economic aspects: inequality, poverty, and the need for state support; food security and the sustainable functioning of agricultural activities.
The study adopts an interdisciplinary approach to the analysis of rural territories, emphasizing their multifunctionality and significance for national policy. The findings provide a foundation for developing strategies for sustainable development, reducing socio-economic disparities, and minimizing environmental risks. The practical value lies in applying the data to formulate state programs for rural revitalization, improving the quality of life, and implementing effective resource management strategies.
Rural territories encompass a significant portion of Ukraine's land area (84.6%) and play a vital role in food and environmental security. However, their current state of crisis demands comprehensive, systematic studies, the integration of modern management methods, and the application of state tools to stimulate rural development.

Key words: *rural areas, sustainable development, environmental problems, demographic situation, quality of life.*

Вступ

Сільські території є важливим компонентом соціально-економічного та екологічного розвитку суспільства, оскільки відіграють ключову роль у забезпеченні продовольчої безпеки, збереженні природного середовища, формуванні культурної спадщини та забезпеченні сталого розвитку. Проте складність і багатогранність цих територій як об'єкта досліджень обумовлюють необхідність комплексного підходу до їх вивчення.

У науковій літературі сільські території досліджуються через призму різноманітних дисциплін, зокрема економіки, соціології, географії, екології та планування простору. Такий міждисциплінарний підхід дозволяє глибше зрозуміти специфіку розвитку цих територій, зокрема виклики та перспективи, пов'язані зі зменшенням чисельності населення, урбанізацією, змінами в сільськогосподарській діяльності та адаптацією до кліматичних змін.

Отже, огляд наукової літератури, щодо сільських територій як об'єкта наукових досліджень, присвячено визначенню основних теоретичних і методологічних підходів, ключових тенденцій у дослідженнях, а також виявленню прогалин, які потребують подальшого вивчення, що сприятиме систематизації знань про сільські території та формуванню нових наукових підходів до їх дослідження.

Метою роботи є визначення основних теоретичних і методологічних підходів до дослідження сільських територій, виявлення ключових наукових тенденцій та прогалин, які потребують подальшого вивчення.

Матеріал і методи

Огляд літературних джерел було здійснено за допомогою програми VOSviewer.

В огляд включені рецензовані статті журналів, що знайдені при пошуку у базі даних PubMed. Пошук здійснювався серед статей за ключовим виразом «rural settlements» (сільські території).

Результати

У результаті стратегії пошуку було знайдено загалом 990 статей з 1924 по 2024 роки. Найбільша кількість статей, які містили ключовий термін «сільські території», виявлена у 2022 році (рис. 1).

За допомогою програми VOSviewer був здійснений аналіз знайдених літературних джерел, що зображено у вигляді хмари бібліографічних даних. Це зображення демонструє велику мережу, що показує зв'язки та взаємозв'язки між різними поняттями, пов'язаними з населенням, здоров'ям, соціальними та екологічними факторами у межах сільських населених пунктах. Вузли або вершини у хмарі представляють різні ключові слова або терміни, такі як «населення», «біорізноманіття», «довкілля», «здоров'я», «якість життя».

Обговорення

Сільські території України відіграють ключову роль у соціально-економічному розвитку країни. Значна частина площі нашої держави охоплює сільські території, на яких мешкає близько третини населення. Їхнє значення полягає у забезпеченні продовольчої безпеки та зростанні експортного потенціалу України (Палапа та ін., 2023).

Згідно з дослідженням ДУ «Інститут регіональних досліджень ім. М. Долішнього НАН України» (2020 рік), площа переважно сільських територій становить 487288,2 км², або 84,6% загальної площі країни. Лідерами за обсягами таких територій є Одеська область (30773,4 км²) і Житомирська область (26792,4 км²). Найменша площа зафіксована у Чернівецькій області (7943,1 км²). Частка населення, яке мешкає на переважно сільських територіях, становить 37,7%. Найвищий відсоток зафіксовано в Закарпатській області (78,8%), найнижчий – у Донецькій (4,9%) (Сторонянська та ін., 2021).

Відповідно до Закону України «Про сільськогосподарську дорадчу діяльність», сільська місцевість визначається як територія поза межами міст, що є зонами сільськогосподарського виробництва та забудови. У вітчизняній науковій літературі сільські території тлумачаться як складна, багатофункціональна природна, соціально-економічна та виробничо-господарська система, що має специфічні структурні та природні характеристики (Костюченко, 2017). А. Мазур та О. Дмитрик визначають сільські території як об'єднання населення, сільськогосподарських угідь, органів самоврядування та громадських об'єднань. Водночас термін «сільська місцевість» доцільно застосовувати для окремих населених пунктів (Мазур і Дмитрик, 2016).

Проблеми сільських територій вивчаються у контексті економічних, екологічних, соціальних та географічних аспектів. Дослідження Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна пропонує підходи до визначення економічної сутності сільських територій, включаючи природно-географічний, історичний та адміністративно-управлінський аспекти (Третяк і Бреус, 2023).

Науковці Інституту агроекології і природокористування НААН виділяють екологічні проблеми сільських населених пунктів, зокрема забруднення повітря, води, ґрунтів, управління відходами та демографічну кризу (Палапа та ін., 2023).

І. Дністрянська вказує, що однією з основних причин занепаду сільських територій є радянський стереотип «неперспективності» села, що вимагає нових підходів до відродження українського села з використанням сучасних технологій і методів (Дністрянська, 2019).

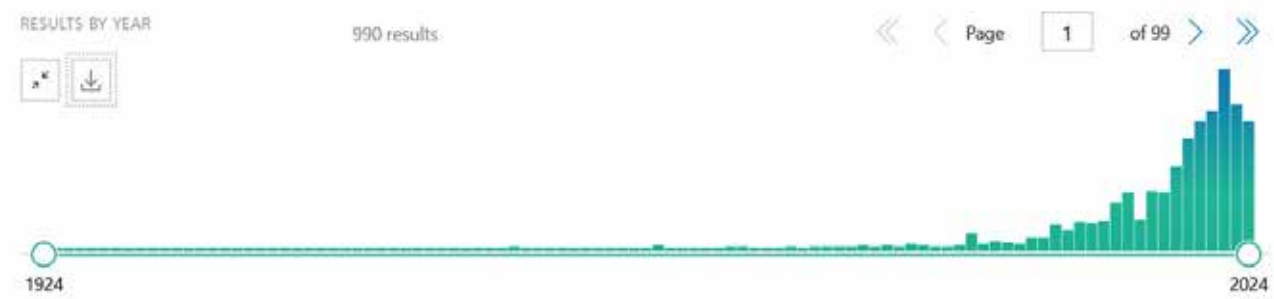


Рис. 1. Викопіювання із ресурсу PubMed

М.А. Хвесик та М.В. Ільїна акцентують увагу на стратегічних пріоритетах, які повинні базуватися на стабільному ресурсному забезпеченні, партнерстві між владою і громадами, диверсифікації сільського господарства та поліпшенні соціального середовища (Хвесик і Ільїна, 2018).

Для відновлення та розвитку постраждалих сільських територій В.П. Третяк і Д.К. Бреус вважають за необхідне застосування комплексного підходу та державних інструментів стимулювання аграрного виробництва (Третяк і Бреус, 2023).

Якість життя сільського населення та демографічна ситуація на селі, особливо на радіоактивно забруднених територіях, є досить гострою проблемою і потребує фінансової підтримки для відродження та створення сприятливих умов проживання і відновлення населення (Romanchuk et al., 2023). Ведення сільського господарства та низька екологічна культура сільського населення призводить до зниження якості питної води, що впливає на здоров'я сільських мешканців, особливо вразливою категорією серед яких є діти (Valerko et al., 2022).

Оцінюючи наукові дослідження зарубіжних учених, які стосуються сільських населених пунктів, за допомогою бібліографічної хмари (рис. 2), можна визначити такі основні напрями досліджень:

– сільське населення та демографічна ситуація на селі – займають пріоритетне місце у наукових дослідженнях;

– екологічні проблеми СНП: забруднення атмосферного повітря, сільське господарство, зміна клімату, проблеми питного водопостачання, екосистемні послуги, лісове господарство, проблеми управління відходами та ін.;

– соціально-економічні виклики у сільських регіонах, які визначаються через бідність, дохід та соціальний клас населення;

– необхідність у державній допомозі та розвитку сільських громад;

– основна діяльність у сільських населених пунктах – це сільське господарство;

– продовольча безпека;

– медичні проблеми на віддалених сільських територіях тощо.

Сталий розвиток сільської місцевості займає пріоритетне місце серед наукових досліджень. Розробка програм стійкого розвитку сільської місцевості є необхідною для скорочення нерівності між сільськими і міськими районами у період стрімкої урбанізації та відновлення сільської місцевості (Zhao & Yin, 2023). Просторове та часове поширення сільських поселень має вирішальне значення для відродження та стійкого розвитку сільських районів (Zhou et al., 2022). Реконструкція сільських райо-

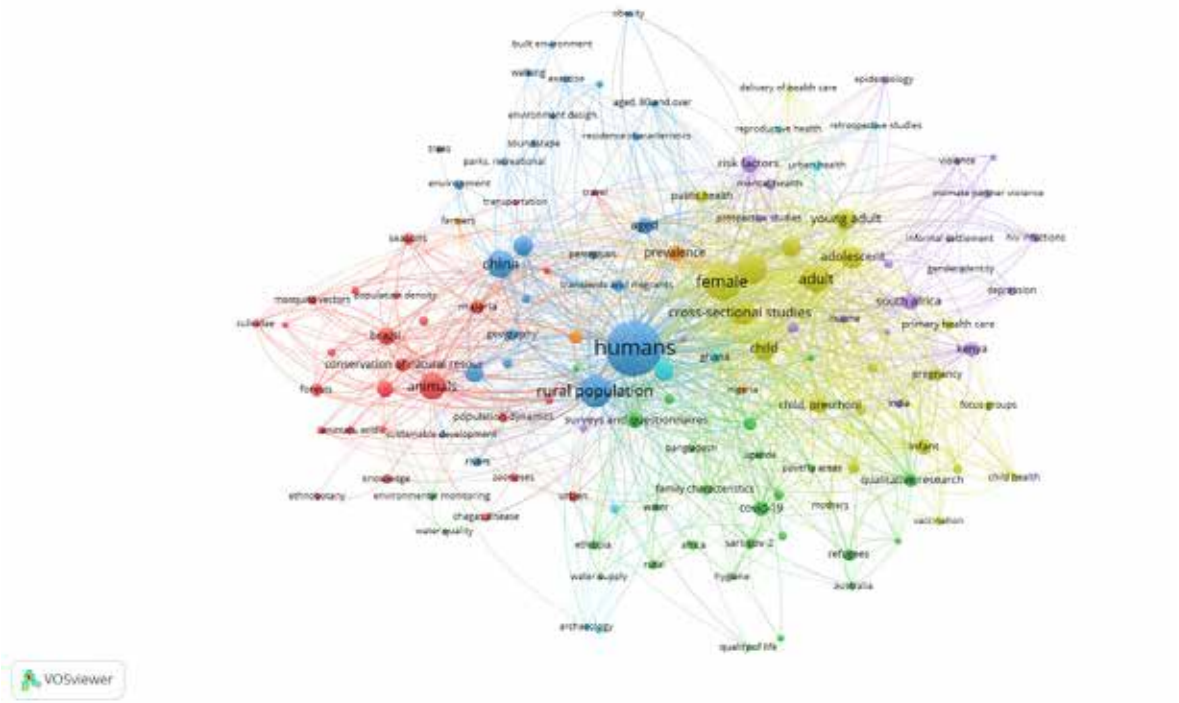


Рис. 2. Бібліографічна хмара побудована за ключовим виразом «сільські території»

нів відіграє вирішальну роль у відродженні сільських районів для ефективного координування міського та сільського розвитку (Nie et al., 2023).

Серед екологічних проблем велика частина досліджень присвячена зміні клімату. Встановлено, що мешканці сільських поселень стикаються із суттєвими проблемами через зміну клімату, результатами чого є посуха і злидні (Melore & Nel, 2020). Значна частина наукових досліджень зосереджена на забрудненні атмосферного повітря на територіях сільських поселень. Доведена позитивна кореляція із викидами вуглецю у межах сільських селітебних територій, де переважає промисловість (Yang et al., 2023). Через деградацію водозбірних споруд та розширення поселень у зонах, які піддаються повеням, сильні опади можуть призвести до катастрофічних паводків, що потребує прийняття обґрунтованих рішень на основі оцінки ризику (Tiepolo et al., 2021).

Оптимізація системи управління відходами є обов'язковою умовою для підвищення ефективності використання сільської інфраструктури та постійного впливу на стале функціонування сільських населених пунктів (Shen & Wang, 2021).

При дослідженні соціальної складової сільської місцевості виявлено, що населення з низьким рівнем освіти та доходів, що є характерним для сільської місцевості, є менш досвідченим у питаннях здоров'я, профілактики захворювань та має низький рівень самооцінки здоров'я (Shayakhmetov et al., 2020).

Діяльність людини, фізичне та навколишнє середовище значно корелюють із здоров'ям людини, а найвищий рівень зв'язку виявлено із антропогенною діяльністю людства (Tong et al., 2022).

Висновки

Отже, сільські селітебні території є важливою складовою соціально-економічної політики України і відіграють важливу роль у забезпеченні екологічної та продовольчої безпеки. Нині переважно сільські території становлять 84,6% від загальної площі України і на них проживає 37,7% населення країни. Однак, кризовий стан, в якому перебуває сільська місцевість, потребує постійних та системних досліджень.

Список використаної літератури

Дністрянська І. Наукові дослідження географії сільських поселень України: еволюція методологічних підходів у контексті актуальних викликів. *Вісник Львівського університету. Серія географічна.* 2019. № 53. С. 113–124. http://doi.org/10.30970/vgg.2019.53.10662.

Костюченко Д.Л. Розвиток сільських територій в Україні: проблеми та перспективи. *Ефективна економіка.* 2017. № 4. [Електронний ресурс]. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5556 (дата звернення 10.11.2024).

Мазур А.Г., Дмитрик О.В. Господарства населення як економічна категорія та суб'єкт облаштування сільських територій. *Економіка. Фінанси. Менеджмент.* 2016. № 11. [Електронний ресурс]. URL: http://efm.vsau.org/files/pdfa/3392.pdf (дата звернення 10.11.2024).

Палапа Н.В., Білотіл В. Ю., Гончар С. М., Бабікова К. О. Сільські території України: сучасний стан, проблеми, шляхи розв'язання. *Збалансоване природокористування.* 2023. № 1. С. 53–65. http://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2023.278539.

Сторонянська І.З., Залуцький І.Р., Патицька Х.О. Сільські території в Україні: практика ідентифікації та інструменти розвитку : наук.-аналітич. доповідь. Львів : ДУ «Інститут регіональних досліджень ім. М. Долішнього НАН України», 2021. 137 с.

Третяк В.П., Бреус Д.К. Формування пріоритетів повоєнного відновлення постраждалих сільських територій та подальшого їх сталого розвитку. *Проблеми та перспективи розвитку підприємництва.* 2023. № 30. С. 26–37. https://doi.org/10.30977/PPB.2226-8820.2023.30.26.

Хвесик М.А., Ільїна М.В. Методологічні засади диференціації сільських територій. *Економіка АПК.* 2018. № 4. С. 12–18.

Melore TW, Nel V. Resilience of informal settlements to climate change in the mountainous areas of Konso, Ethiopia and QwaQwa, South Africa. *Jamba.* 2020. № 12, 778. http://doi.org/10.4102/jamba.v12i1.778.

Nie X, Wang C, Huang W. Evolution and spatial reconstruction of rural settlements based on composite features of agglomeration effect and ecological effects in the Hexi Corridor, Northwest China. *PLoS One.* 2023. 18 (11), e0294037 p. http://doi.org/ 10.1371/journal.pone.0294037.

Romanchuk L., Herasymchuk L., Valerko R., Pitsil A. Study of the Demographic Component Quality of Life of the Population of the Radioactively Contaminated Territory of the Zhytomyr Region

Using ArcGIS Software. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2023. Vol. 24 (5). P. 63–75.

Shen Y, Wang C. Optimisation of Garbage Bin Layout in Rural Infrastructure for Promoting the Renovation of Rural Human Settlements: Case Study of Yuding Village in China. *Int J Environ Res Public Health*. 2021. 18 (21), 11633 p. http://doi.org/10.3390/ijerph182111633.

Tiepolo M, Braccio S, Fiorillo E, Galligari A, Katiellou GL, Massazza G, Sitta AA, Tankari AM, Tarchiani V. Method for pluvial flood risk assessment in rural settlements characterised by scant information availability. *MethodsX*. 2021. № 25. 101532 p. http://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101532.

Tong S, Zhu Y, Li Z. Correlation Study between Rural Human Settlement Health Factors: A Case Study of Xiangxi, China. *Comput Intell Neurosci*. 2022. № 12. 2484850 p. http://doi.org/10.1155/2022/2484850.

Valerko R., Herasymchuk L., Pitsil A., Palkevich J.: GIS-based assessment of risk for drinking water contamination to children's health in rural settlements. *Ekológia (Bratislava)*. 2022. Vol. 41, № 4. P. 312–321. http://doi.org/.2478/eko-2022-0032.

Yang L, Zhang H, Liao X, Wang H, Bian Y, Liu G, Luo W. The Relationship between Spatial Characteristics of Urban-Rural Settlements and Carbon Emissions in Guangdong Province. *Int J Environ Res Public Health*. 2023. № 20 (3), 2659 p. http://doi.org/10.3390/ijerph20032659.

Zhao S, Yin M. Research on Rural Population/Arable Land/Rural Settlements Association Model and Coordinated Development Path: A Case Analysis of the Yellow River Basin (Henan Section). *Int J Environ Res Public Health*. 2023. 20 (5), 3833 p. http://doi.org/10.3390/ijerph20053833.

Zhou H, Wang C, Bai Y, Ning X, Zang S. Spatial and temporal distribution of rural settlements and influencing mechanisms in Inner Mongolia, China. *PLoS One*. 2022. 17 (11), e0277558. http://doi.org/ 10.1371/journal.pone.0277558.

References

Dnistryanska, I. (2019). Naukovi doslidzhennia geografiї silskykh poselen Ukrainy: evoliutsiia metodolohichnykh pidkhodiv u konteksti aktualnykh vyklykiv [Scientific research on the geography of rural settlements in Ukraine: Evolution of methodological approaches in the context of current challenges]. *Visnyk Lvivskoho Universytetu. Seriia Heohrafichna [Bulletin of Lviv University. Geography Series]*, 53, 113–124. http://doi.org/10.30970/vgg.2019.53.10662 [in Ukrainian].

Kostiuchenko, D.L. (2017). Rozvytok silskykh terytorii v Ukraini: problemy ta perspektyvy [Development of rural areas in Ukraine: Problems and prospects]. *Efektyvna Ekonomika [Effective Economy],* 4. [Electronic resource]. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5556 (access date 10.11.2024) [in Ukrainian].

Mazur, A.H., & Dmytryk, O.V. (2016). Hospodarstva naselennia yak ekonomichna katehoriia ta subiekt oblashtuvannia silskykh terytorii [Household farms as an economic category and a subject of rural territorial arrangement]. *Ekonomika. Finansy. Menedzhment [Economics. Finance. Management],* 11. [Electronic resource]. http://efm.vsau.org/files/pdfa/3392.pdf [in Ukrainian].

Palapa, N.V., Bilotil, V.Yu., Honchar, S.M., & Babikova, K.O. (2023). Silski terytorii Ukrainy: suchasnyi stan, problemy, shliakhy rozviazannia [Rural territories of Ukraine: Current state, problems, solutions]. *Zbalansovane Pryrodokorystuvannia [Balanced Natural Resource Use]*, 1, 53–65. http://doi.org10.33730/2310-4678.1.2023.278539 [in Ukrainian].

Storonyanska, I.Z., Zalutskyi, I.R., & Patytska, Kh.O. (2021). Silski terytorii v Ukraini: praktyka identyfikatsii ta instrumenty rozvytku: nauk.-analitych. dopovid [Rural territories in Ukraine: Identification practices and development tools: Scientific-analytical report]. Lviv : DU "Instytut rehionalnykh doslidzhen im. M. Dolishnoho NAN Ukrainy" [State Institution "Institute of Regional Studies named after M. Dolishniy of the NAS of Ukraine"] [in Ukrainian].

Tretyak, V.P., & Breus, D.K. (2023). Formuvannia priorytetiv povoiannoho vidnovlennia postrazhdalykh silskykh terytorii ta podalshoho yikh staloho rozvytku [Formation of priorities for post-war recovery of affected rural territories and their further sustainable development]. *Problemy ta Perspektyvy Rozvytku Pidpryiemnytstva [Problems and Prospects of Business Development],* 30, 26–37. https://doi.org/10.30977/PPB.2226-8820.2023.30.26 [in Ukrainian].

Khvesyk, M.A., & Ilina, M.V. (2018). Metodolohichni zasady dyferentsiatsii silskykh terytorii [Methodological foundations of rural territorial differentiation]. *Ekonomika APK [Economy of Agro-Industrial Complex],* 4, 12–18 [in Ukrainian].

Melore, T.W., & Nel, V. (2020). Resilience of informal settlements to climate change in the mountainous areas of Konso, Ethiopia and QwaQwa, South Africa. *Jamba*, 12 (1), 778. https://doi.org/10.4102/jamba.v12i1.778 [in English].

Nie, X., Wang, C., & Huang, W. (2023). Evolution and spatial reconstruction of rural settlements based on composite features of agglomeration effect and ecological effects in the Hexi Corridor, Northwest China. *PLoS One*, 18 (11), e0294037. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294037 [in English].

Romanchuk, L., Herasymchuk, L., Valerko, R., & Pitsil, A. (2023). Study of the demographic component quality of life of the population of the radioactively contaminated territory of the Zhytomyr region using ArcGIS software. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 24 (5), 63–75 [in English].

Shen, Y., & Wang, C. (2021). Optimisation of garbage bin layout in rural infrastructure for promoting the renovation of rural human settlements: Case study of Yuding Village in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18 (21), 11633. https://doi.org/10.3390/ijerph182111633 [in English].

Tiepolo, M., Braccio, S., Fiorillo, E., Galligari, A., Katiellou, G.L., Massazza, G., Sitta, A.A., Tankari, A.M., & Tarchiani, V. (2021). Method for pluvial flood risk assessment in rural settlements characterised by scant information availability. *MethodsX*, 25, 101532. https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101532 [in English].

Tong, S., Zhu, Y., & Li, Z. (2022). Correlation study between rural human settlement health factors: A case study of Xiangxi, China. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 12, 2484850. https://doi.org/10.1155/2022/2484850 [in English].

Valerko, R., Herasymchuk, L., Pitsil, A., & Palkevich, J. (2022). GIS-based assessment of risk for drinking water contamination to children's health in rural settlements. *Ekológia (Bratislava)*, 41(4), 312–321. https://doi.org/10.2478/eko-2022-0032 [in English].

Yang, L., Zhang, H., Liao, X., Wang, H., Bian, Y., Liu, G., & Luo, W. (2023). The relationship between spatial characteristics of urban-rural settlements and carbon emissions in Guangdong Province. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20 (3), 2659. https://doi.org/10.3390/ijerph20032659 [in English].

Zhao, S., & Yin, M. (2023). Research on rural population/arable land/rural settlements association model and coordinated development path: A case analysis of the Yellow River Basin (Henan Section). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20 (5), 3833. https://doi.org/10.3390/ijerph20053833 [in English].

Zhou, H., Wang, C., Bai, Y., Ning, X., & Zang, S. (2022). Spatial and temporal distribution of rural settlements and influencing mechanisms in Inner Mongolia, China. *PLoS One*, 17 (11), e0277558. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0277558 [in English].

Отримано: 14.10.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

УДК 502:630:574.4;502.53:57.044
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.21

БІОГЕОХІМІЧНИЙ ЦИКЛ ПЛЮМБУМУ В УМОВАХ ЕКОСИСТЕМ ГРАБОВИХ ДІБРОВ СЕРЕДНЬОГО ПРИДНІПРОВ'Я

Д. В. Лукашов[1], Т. С. Тесьолкіна[2]

Забруднення міського атмосферного повітря є глобальною проблемою, яку визнано важливим чинником впливу на здоров'я людини. Зелені насадження та лісові екосистеми в умовах міст відіграють визначальну роль у зменшенні ступеню забруднення атмосферного повітря. Проте вони самі зазнають негативного впливу від забруднення, що може викликати фітотоксичні ефекти, зменшувати стійкість зелених насаджень до інших негативних чинників, призводити до зниження ефективності очищувальної здатності. Важкі метали, зокрема Pb, є пріоритетними забруднювачами атмосферного повітря. На відміну від інших полютантів, важкі метали після надходження до лісової екосистеми здатні затримуватися в її компонентах, що призводить до їх поступового накопичення. Для визначення наслідків надходження Pb до екосистем зелених насаджень в умовах урбанізованого середовища необхідно провести оцінку збалансованості його біогеохімічного циклу в лісових екосистемах за різного ступеню антропогенного навантаження. Як модельні екосистеми було обрано грабові діброви двох територій природно-заповідного фонду України, що зазнають різного ступеню антропогенного впливу: НПП «Голосіївський» в межах мегаполісу міста Києва та Канівський природний заповідник, умови якого є максимально наближеними до природних. В результаті проведеного багаторічного дослідження модельних екосистем було встановлено особливості акумуляції Pb у ґрунтах, проведено оцінку величини потоків вертикальної міграції Pb лізиметричним методом, визначено рівні надходження сполук металу в процесі осадження у складі атмосферних опадів на територію грабових дібров, проведено оцінку запасів Pb у фітомасі головної деревної породи грабових дібров та динаміку накопичення сполук металу у лісовій підстилці. В результаті встановлено, що біогеохімічна система міграції Pb грабової діброви Канівського природного заповідника характеризується збалансованістю потоків металу, коли обсяги надходження Pb з атмосферними опадами та опалим листям врівноважено потоком їх втрат в процесі вимивання вертикальним стоком ґрунтових вод до елювіального шару ґрунту. Це свідчить про відсутність затримки та накопичення сполук Pb в екосистемі Канівського природного заповідника. Водночас екосистема грабової діброви НПП «Голосіївський» характеризується незбалансованістю біогеохімічного циклу Pb. Потоки надходження сполук металу з атмосферними опадами та листяним опадом не врівноважені їх втратами в процесі

[1] доктор біологічних наук, професор,
завідувач кафедри екології та зоології
(Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ)
e-mail: lukashov@knu.ua
ORCID: 0000-0002-1375-0447
[2] аспірантка кафедри екології та зоології
(Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ)
e-mail: t.tesolkina@knu.ua
ORCID: 0009-0008-8111-7089

вимивання вертикальним стоком ґрунтових вод, що призводить до затримки та накопичення Pb у рослинній фітомасі грабу. В результаті у забезпеченні функціонуванні біогеохімічного циклу Pb в екосистемі НПП «Голосіївський» значну роль відіграє біологічна складова системи «рослина-підстилка-ґрунт-рослина», коли 21% потоку надходження Pb до підстилки забезпечується фітомасою листяного опаду.

Ключові слова: *лісові екосистеми, ґрунт, атмосферне осадження, лісова підстилка, листяний опад, фітомаса, біоакумуляція рослинами, фітотоксичність, біогеохімічний цикл мікроелементів, забруднення.*

BIOGEOCHEMICAL CYCLING OF LEAD IN THE HORNBEAM FOREST ECOSYSTEMS OF THE MIDDLE DNIPRO REGION

D. V. Lukashov, T. S. Tesolkina

Urban air pollution is a globally recognized issue, significantly impacting human health. Urban green spaces and forest ecosystems play a crucial role in mitigating air pollution; however, they are themselves vulnerable to pollution, leading to phytotoxic effects, reduced resilience of vegetation to other stressors, and diminished air purification efficiency. Heavy metals, particularly lead (Pb), are among the most concerning air pollutants. Unlike other pollutants, heavy metals can be absorbed and accumulated within forest ecosystems, leading to potential long-term ecological consequences.

This study aims to evaluate the biogeochemical cycling of Pb in urban green spaces under varying levels of anthropogenic pressure. The research focuses on hornbeam groves in two areas within the Nature Reserve Fund of Ukraine: the Holosiivskyi National Nature Park (NPP) in Kyiv, which experiences significant urban influence, and the Kaniv Nature Reserve, which is relatively undisturbed. Through long-term monitoring, we assessed Pb accumulation in soils, quantified Pb vertical migration using lysimetry, determined the levels of Pb deposition via atmospheric processes, and analyzed Pb dynamics within the forest litter and hornbeam phytomass.

Our findings reveal a balanced Pb biogeochemical cycle in the Kaniv Nature Reserve, where Pb inputs from atmospheric deposition and leaf litter are offset by losses due to leaching into deeper soil layers, indicating no significant Pb retention. Conversely, the hornbeam groves in the Holosiivskyi NPP exhibit an imbalanced Pb cycle, with higher Pb retention in the ecosystem, particularly within the phytomass. This imbalance highlights the significant role of the biological component in maintaining the Pb cycle in urban forests, with 21% of Pb in the litter derived from leaf litterfall in the Holosiivskyi NPP.

Key words: *forest ecosystems, soil, atmospheric deposition, forest litter, leaf litterfall, phytomass, bioaccumulation by plants, phytotoxicity, microelement biogeochemical cycle, pollution.*

Вступ

Забруднення атмосферного повітря збільшує короткостроковий та довгостроковий ризик розвитку серцево-судинних і респіраторних захворювань міського населення. За оцінками забруднення повітря щорічно спричиняє у світі понад 4 мільйони передчасних випадків смертей (Diener & Mudu, 2021). Зелені насадження, як один із елементів урбанізованого середовища, відіграють значну роль у покращенні екологічного стану міст. Рослинність в урбоекосистемах, крім регуляції мікроклімату, захисту від шумового забруднення та поліпшення естетичного вигляду міського середовища, відіграє важливу роль у зменшенні забруднення повітря (Chen et al., 2016).

Водночас у результаті поглинання полютантів з атмосферного повітря лісові екосистеми нагромаджують важкі метали, що може змінювати збалансованість біогеохімічних циклів хімічних елементів та призводити до їхнього накопичення в екосистемах, що призводить до появи фітотоксичних ефектів, що негативно впливають на функціональний стан зелених насаджень. Незважаючи на те, що основним забруднювачем повітря, який має негативний вплив на ліси, виступає O_3, важкі метали завдяки здатності до накопичення у компонентах лісових екосистем можуть призводити до їх хронічного забруднення (Percy & Ferretti, 2004). Дослідженнями показано дефоліацію міських вічнозелених насаджень у періоди максимального забруднення повітря під час опалювального періоду (Diener & Mudu, 2021). Таким чином, зелені насадження у містах та лісові екосистеми у передмісті зазнають вираженого фітотоксичного впливу важких металів, що потребує оцінки біогеохімічних циклів їх міграції з метою прогнозування стійкості угрупо-

вань зелених насаджень (Риженко, 2018). У результаті поглинання рослинами важких металів з атмосфери та їх подальшого надходження з листяним опадом показано суттєве зростання їх концентрації у лісовій підстилці та подальше потрапляння до ґрунту, що зумовлює можливість їх міграції до ґрунтових вод та доступність для кореневого поглинання рослинами, що становить потенційну загрозу для нормального функціонування лісових екосистем (Scheid et al., 2009; Maksimtsev et al., 2021; Montemagno et al., 2022).

Грабові діброви є зональним типом широколистяних лісових екосистем Середнього Придніпров'я, які відіграють важливу природоохоронну роль (Воробйов та ін., 2008). Водночас показана надзвичайна ефективність насаджень грабу в умовах лінійних захисних лісосмуг на узбіччях доріг для очистки повітря від Zn та Cu (Maksimtsev et al., 2021). В умовах грабово-дубової діброви саме граб звичайний (*Carpinus betulus)* має найвищі рівні накопичення важких металів Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Pb, у порівнянні з дубом та кизилом (Kaszala et al., 2003). Показано, що цей вид має високий потенціал для дендроремедіації забруднених ґрунтів Pb та Zn (Halasz et al., 2022). Таким чином, екосистеми грабових дібров є зручною моделлю для встановлення закономірностей функціонування біогеохімічних систем міграції важких металів та визначення критеріїв їх стійкості до поліметалічного забруднення.

Метою представленого дослідження була оцінка збалансованості біогеохімічного циклу Pb в умовах екосистем грабових дібров Середнього Придніпров'я, що зазнають різного ступеню антропогенного впливу. Для цього було сплановано та реалізовано багаторічне комплексне дослідження, що включало такі етапи:

1. Встановлення особливостей розподілу Pb по ґрунтових горизонтах та оцінка лізиметричним аналізом величини вертикальної міграції в процесі інфільтрації ґрунтових вод.
2. Визначення концентрації Pb у складі атмосферних опадів та оцінка річних обсягів вологого осадження в межах модельних лісових екосистем.
3. Аналіз динаміки накопичення Pb у фітомасі грабу та кількісна оцінка потоків надходження металу у складі листяного опаду до лісової підстилки та ґрунту.
4. Визначення особливостей накопичення Pb у складі лісової підстилки з метою оцінки її ролі у процесах міграції металу в системі «листя-підстилка-ґрунт».
5. Оцінка збалансованості біогеохімічної системи міграції Pb у модельних лісових екосистемах та визначення екологічних чинників, що визначають особливості її функціонування.

Матеріал та методи

Для проведення дослідження було обрано дві модельні екосистеми грабових дібров природно-заповідного фонду України – Національний природний парк «Голосіївський», що є унікальним лісовим масивом у межах мегаполісу міста Києва, та Канівський природний заповідник, що є одним з найстаріших лісових заповідників України та, відповідно, представляє умови, максимально наближені до природних. Модельні виділи обраних лісових екосистем грабових дібров заповідних територій є подібними за даними таксаційного опису (табл. 1).

Атмосферні опади збирали за допомогою дощових колекторів, розміщених під поло-

Таблиця 1

Таксаційний опис модельних лісових екосистем та показники їхньої біологічної продуктивності

Квартал/виділ	Площа, га	Характеристика деревостану	Ярус	Вік, роки	Висота, м	Діаметр, см	Клас бонітету	Тип лісу	Повнота	Запас деревини, м^3/га	Запаси фітомаси головної деревної породи, т/га				Річний приріст фітомаси, т/га
											Стовбур з корою	Гілки	Листя	Коріння	
НПП «Голосіївський»															
26/9	0,8	10ГЗ	1	70	25	28	I	Д2ГД	0,70	320	282,1	45,5	9,3	98,4	2,76
Канівський природний заповідник															
15/2	7,0	10ГЗ	1	100	25	28	II	Д1ГД	0,70	300	259,7	45,2	7,9	88,6	1,06

гом лісу на рівні землі через кожні 2 м від стовбуру найбільшого дерева по 4–8 шт. згідно (Laskowski et al., 1995). Колектори були побудовані з пластикових контейнерів і лійок діаметром 13 см. Лійки були захищені від потрапляння твердих частинок поліпропіленовою сіткою з вічком 5×5 мм. Відбір води для аналізу у холодний період року проводили щомісяця, у випадку рясних дощів та у літні місяці – протягом доби після завершення опадів.

Для оцінки вертикального ґрунтового стоку було використано стаціонарні тарілчасті лізиметри з нульовою напругою (zero-tension pan lysimeter), які є простим та ефективним засобом для вимірювання *in situ* руху ґрунтових вод та розчинених речовин (Schmidt & Henry, 2008; Makowski et al., 2020). Лізиметри виготовлені із сантехнічного поліпропілену без використання металевих деталей. Площа одного лізиметра становила 0,1 м^2. На кожній ділянці було розміщено по 4 лізиметри на глибині 10–12 см для збору вертикального стоку ґрунтових вод з гумусового горизонту ґрунту. Зразки ґрунтових вод з лізиметрів відбирали після інтенсивних опадів протягом вегетаційного сезону або по мірі їх наповнення один раз на місяць.

Проби води атмосферних опадів та лізиметричних вод фільтрували через паперовий фільтр ФС «біла стрічка» (діаметр пор 7–20 мкм) та концентрували шляхом випарювання 1 л до 10 мл на піщаній бані без доведення до кипіння з додаванням 1 мл 4 н HNO_3 («осч») на 1 л проби (Набиванець та ін., 1996).

Пробні площадки для відбору зразків ґрунту визначали згідно ДСТУ ГОСТ 17.4.3.01:2019. Точкові проби відбирали методом «конверту» на трьох ділянках 3×3 м з двох генетичних горизонтів – гумусового на глибині 5 см та елювіального на глибині 20–25 см. Для визначення концентрації важких металів застосовували екстракцію *aqua regia* шляхом обробки 0,5 г кожного зразка ґрунту сумішшю 2 мл HNO_3 і 6 мл HCl протягом 2 годин згідно ДСТУ ISO 11466:2001 (Tisserand et al., 2024).

Проби лісової підстилки відбирали протягом 2020–2023 рр. щомісячно у період з 15 по 20 числа з ділянок 1×1 м. Зібраний матеріал висушували за кімнатної температури та зважували з метою визначення запасу підстилки. Частину проби підстилки використовували для визначення фракційного складу, відокремлюючи опале листя, гілки, кору, насіння та недиференційовану ферментовану масу (труху). Зразки листяної фітомаси грабу збирали вручну з приземних гілок або, за можливості, з впалих дерев та гілок. Зразки деревини відбирали з дерев або великих скелетних гілок діаметром понад 10 см, що впали протягом 1–2 місяців.

Висушені зразки фітомаси та лісової підстилки озолювали протягом 12 год при 450°C. Отриману золу кип'ятили у 15 мл 4 М HNO_3 («осч») протягом 30 хв., після чого розчин фільтрували через паперовий фільтр. Фільтр двічі промивали дистильованою водою до досягнення об'єму 10 мл.

Визначення концентрації важких металів проводили на базі кафедри екології та зоології ННЦ «Інститут біології та медицини» за допомогою атомно-адсорбційного спектрофотометру С115-М1 (SELMI, Україна). Аналіз здійснювали шляхом безпосереднього введення рідкої проби у полум'я ацетилен-повітря. Для компенсації неселективного поглинання полум'я використовували дейтерієвий коректор фону. Реєстрацію аналітичних показників проводили за допомогою комп'ютерно-аналітичного комплексу КАС-101. Також зразки за 2020–2021 рр. було проаналізовано методом оптико-емісійної спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP-OES, iCAP 6000 ICP Spectrometer, Thermo Fisher Scientific Corporation) в Інституті ботаніки Ганноверського університету імені Готфріда Вільгельма Лейбніца (Turcios et al, 2021). Концентрацію Pb у твердих зразках (ґрунт, підстилка, рослинний матеріал) представляли у мг/кг маси сухої речовини, у воді атмосферних опадів – у мкг/л, ґрунтових водах – у мг/л.

Середні величини представляли як середнє арифметичне (X), їх мінливість оцінювали як стандартне відхилення (середнє квадратичне відхилення, SD). Нормальність розподілу даних встановлювали за допомогою критерію *Shapiro – Wilk's W-test* як найбільш чутливого (Conti et al., 2005). Оскільки більшість вимірів була обмеженою за кількістю (3–5 вимірів), то для попарного порівняння середніх вибіркових величин застосовували непараметричній *Mann-Whitney U-test* з рівнем значимості $p<0,05$, як найбільш потужний для малих вибірок (Guidance …, 2002). Встановлення статистичної значущості відмінностей між кількома вибірками проводили за допомогою тесту *one-way ANOVA*.

Результати

Для концентрації Pb у ґрунті була характерна відсутність суттєвих відмінностей за розподілом по генетичних горизонтах досліджених екосистем: в умовах екосистеми грабової діброви НПП «Голосіївський» концентрація Pb в гумусовому та елювіальному шарах становила 24,7±9,3 мг/кг та 25,5±3,5 мг/кг відповідно; у ґрунті екосистеми Канівського природного заповідника – 19,6±2,1 мг/кг та 20,1±4,5 мг/кг. Можна бачити, що концентрація Pb у ґрунті НПП «Голосіївський» є вищою у 1,3 рази у порівнянні з Канівським природним заповідником. Водночас концентрація Pb у матеріалі лісової підстилки була суттєво нижчою: в умовах НПП «Голосіївський» відповідала діапазону 3,15–10,56 мг/кг, в Канівському природному заповіднику була у 1,9–2,8 раз меншою – 1,69–4,00 мг/кг.

Концентрація Pb в гумусовому та елювіальному шарах ґрунту обох екосистем суттєво (для НПП «Голосіївський» – у 1,4 рази) перевищувала величину середнього вмісту Pb у ґрунтах орних земель України, яка встановлена на рівні 17,3 мг/кг (Клос, 2012). Також концентрація Pb у ґрунтах екосистеми НПП «Голосіївський» у 1,2 рази перевищувала фонові величини для орних земель на місці хвойних та широколистяних лісів, що визначені в середньому на рівні 20,5 мг/кг (діапазон 6,8–66,0 мг/кг) (Єгорова, 2014). Водночас за даними А.І. Самчука та ін. (Самчук та ін., 2019) середній валовий вміст Pb у Голосіївському лісі становив 43 мг/кг, що суттєво вище, ніж зафіксовані нами концентрації металу.

Розрахунок запасів Pb в ґрунтах екосистеми НПП «Голосіївський» показав, що у гумусовому горизонті зосереджено 1,5±0,6 г/м^2 (14,8 кг×га$^{-1}$), в елювіальному горизонті – 5,7±0,8 г/м^2 (57,3 кг×га$^{-1}$). У Канівському природному заповіднику в гумусовому горизонті містилося 1,2±0,1 г/м^2 (11,8 кг×га$^{-1}$) даного металу, в елювіальному – 4,5±1,0 г/м^2 (45,2 кг×га$^{-1}$).

Лізиметричний аналіз ґрунтових вод дозволив оцінити величину потоків вертикальної міграції важких металів до елювіального горизонту ґрунту досліджених екосистем. Величина ґрунтової інфільтрації для грабової діброви НПП «Голосіївський» становила 13,5 л/м^2 (135 м^3×га$^{-1}$), для Канівського природного заповідника – 29,3 л/м^2 (293 м^3×га$^{-1}$). У результаті встановлено, що в умовах Канівського природного заповідника вимивання Pb з гумусового горизонту проходить у 1,6 рази більш інтенсивно, втрати якого протягом року становлять 56 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$ проти 35 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$ в НПП «Голосіївський».

Відомо, що вологе осадження з атмосферними опадами є основним шляхом надходження важких металів до наземних екосистем (Hůnová et al., 2023). При цьому саме транскордонне перенесення атмосферних мас та процеси вологого осадження визначають надходження більшості хімічних елементів до європейських лісових екосистем (Tyler & Olsson, 2006; Connan et al., 2013). Концентрація Pb у воді атмосферних опадів на території НПП «Голосіївський» була вищою у 1,4–1,7 разів та в середньому становила 10,0±1,9 мкг/л. Для екосистеми Канівського природного заповідника середня концентрація Pb в атмосферних опадах дорівнювала 6,0±0,7 мкг/л. Визначена середня концентрація Pb у досліджених екосистемах в цілому відповідала діапазону концентрації Pb для фонових територій Франції, що становила 1,1–6,5 мкг/л (Connan et al., 2013).

Відповідно до даних таксаційного опису модельних виділів обраних лісових екосистем грабових дібров заповідних територій встановлено, що запаси деревини в НПП «Голосіївський» та Канівському природному заповіднику є близькими та становлять 320 м^3/га та 300 м^3/га відповідно. Водночас за величиною щорічного приросту деревної фітомаси грабова діброва НПП «Голосіївський» характеризувалася у 2,6 рази вищою продуктивністю, що становила 2,8 т/га, у той час як для Канівського природного заповідника вона складала 1,1 т/га (див. табл. 1). Аналіз сезонної динаміки концентрації важких металів у деревині грабу показав відсутність статистично значимих відмінностей протягом року. Середня концентрація Pb у деревині грабу НПП «Голосіївський» становила 3,72±0,32 мг/кг, у Канівському природному заповіднику концентрація вона була у 2,2 рази нижчою та становила 1,66±0,23 мг/кг. Для оцінки запасів накопиченого Pb у деревній фітомасі було умовно прийнято, що його концентрація суттєво не відрізняється у складі деревини стовбурів, гілок та коріння (частину зразків деревини було отримано з великих скелетних гілок). Для екосистеми НПП «Голосіївський» встановлено, що у деревині грабу було зосереджено високі запаси Pb, що оцінюються у 1,59±0,14 кг×га$^{-1}$, у Канівському природному заповіднику вони були суттєво меншими та становили 0,66±0,02 кг×га$^{-1}$. Відповідно величина накопи-

чення Pb у річному прирості деревини грабу в НПП «Голосіївський» становила 10,3±0,9 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$, у Канівському природному заповіднику – 1,8±0,1 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$.

Концентрація Pb у листяній фітомасі грабу в умовах НПП «Голосіївський» протягом вегетаційного сезону відповідала діапазону 3,16–4,45 мг/кг, в Канівському природному заповіднику була у 3,7–4,5 рази меншою – 0,69–1,19 мг/кг. В умовах лісового заповідника «Lipny Dół» (Польща) листя грабу на кінець вегетаційного сезону накопичувало 7,27 мг/кг (Laskowski & Berg, 1993). Листя клену та липи у центрі Вроцлава та Валбжиха у червні накопичували Pb відповідно 0,49–0,85 мг/кг та 1,4–9,5 мг/кг. Станом на жовтень концентрація Pb суттєво підвищувалася і досягала у листі клену 4,9–8,0 мг/кг, у листі липи – 6,5–12,4 мг/кг (Piczak et al., 2003).

На початок вегетаційного сезону у молодому листі грабу в умовах обох лісових екосистем концентрація Pb є найменшою (рис. 1). У молодому листі грабу Голосіївського лісу концентрація металу становила 3,16±0,32 мг/кг, у Канівському природному заповіднику – 0,69–0,74 мг/кг. У подальшому спостерігалося поступове накопичення Pb у листяній фітомасі грабу, що досягало максимуму в осінній період під час опадання листя: в умовах НПП – до 4,45±0,15 мг/кг (у 1,4 рази більше у порівнянні з травнем), у Канівському заповіднику – 1,08–1,10 мг/кг (у 1,5–1,6 разів більше). Подібне зростання концентрації Pb зафіксовано для різних видів дерев багатьма авторами (Kim & Fergusson, 1994; Piczak et al., 2003; Shahid et al., 2017). Зростання концентрації Pb у фітомасі рослин пояснюється його активним накопиченням з атмосферних опадів. Показано, що проникнення та накопичення позакореневого Pb у пагонах *Lactuca sativa* сильно корелювало (коефіцієнт кореляції: 0,83) з кількістю опадів (Schreck et al., 2014). При чому накопичення Pb листяною фітомасою відбувається більш активно з атмосферних опадів, ніж при сухому осадженні твердих частинок пилу (Lawson & Mason, 2001).

Для оцінки обсягів надходження листяного опаду було використано результати аналізу сезонної динаміки компонентного складу лісової підстилки досліджених грабових дібров НПП «Голосіївський» за 2021 р. та Канівського природного заповідника за 2021–2022 рр. з припущенням, що маса опалого листя суттєво не змінюється протягом місяця після його надходження до складу підстилки (табл. 1, 2). Розрахунки кількості листяного опаду, що надійшов протягом року до складу підстилки обох екосистем, показали близькі величини: для НПП «Голосіївський» 3200 кг×га$^{-1}$, для Канівського природного заповідника – 2500–3600 кг×га$^{-1}$. Проте, через суттєві відмінності у концентрації Pb у листяній фітомасі обсяги надходження металу з листяним опадом суттєво відрізнялися та становили для НПП «Голосіївський» у 2021 р. 13,8±0,6 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$, для Канівського природного заповідника у 2022 р. – 3,9+0,6 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$.

Протягом року сумарне накопичення Pb лісовою підстилкою грабової діброви НПП «Голосіївський» становило 65,2±34,6 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$, що відповідає величині надходження металу до екосистеми НПП «Голосіївський» у складі листяного опаду та його вологого осадження з атмосфери – 64,6±5,9 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$ (табл. 2). З них 79% формувалося за рахунок вологого осадження Pb у складі атмос-

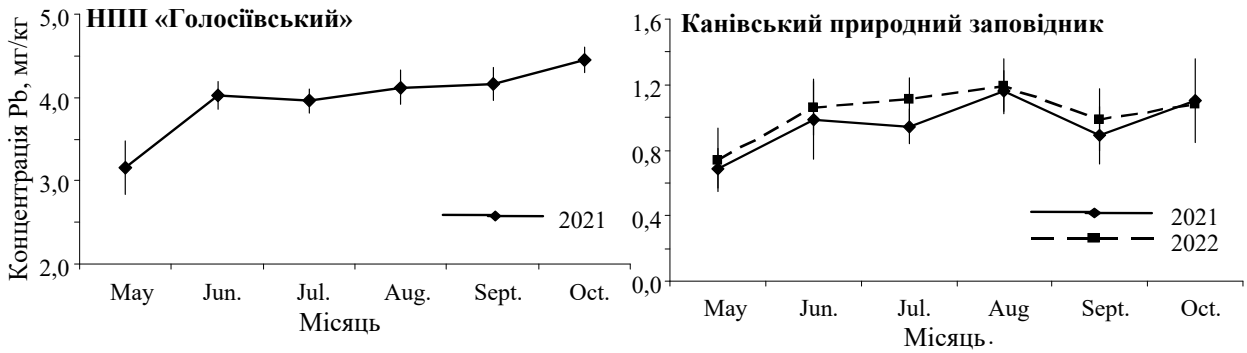


Рис. 1. Динаміка концентрації Pb у листяній фітомасі грабу протягом вегетаційного сезону в умовах екосистеми НПП «Голосіївський» та Канівського природного заповідника

Таблиця 2

Баланс обсягів надходження та вивільнення Pb у структурі біогеохімічного циклу екосистеми грабової діброви НПП «Голосіївський»

Місяць	**Запас Pb, г×га$^{-1}$**		**Накопичення підстилкою/ вивільнення Pb з підстилки, г×га$^{-1}$**		**Сумарне надходження Pb (листяний опад + атмосферні опади), г×га$^{-1}$**		**Надходження Pb з листяним опадом, г×га$^{-1}$**		**Надходження Pb з атмосферними опадами, г×га$^{-1}$**		**Ґрунтовий стік Pb, г×га$^{-1}$**	
	X	**SD**	**X**	**SD**	**X**	**X**	**SD**	**SD**	**X**	**SD**	**X**	**SD**
01.2021	107,8	5,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
02.2021	102,1	4,5	-5,7	-	4,4	-	-	-	4,4	0,7	8,1	1,0
03.2021	104,2	4,9	2,1	-	2,6	-	-	-	2,6	0,8	-	-
04.2021	106,0	3,9	1,9	-	4,8	-	-	-	4,8	0,6	-	-
05.2021	97,2	7,2	-8,8	-	10,0	-	-	-	10,0	1,0	7,9	1,0
06.2021	69,9	8,6	-27,4	7,9	0,6	0,1	-	-	0,6	0,1	8,5	1,0
07.2021	26,5	7,8	-43,3	8,2	11,7	1,2	-	-	11,7	1,2	1,4	0,2
08.2021	39,1	9,9	12,6	8,8	7,8	1,5	4,5	0,2	3,2	1,2	5,6	0,7
09.2021	32,9	6,7	-6,3	8,3	3,9	0,6	1,7	0,1	2,2	0,6	-	-
10.2021	36,2	9,3	3,4	8,0	5,8	0,2	5,8	0,2	-	-	-	-
11.2021	41,7	4,3	5,4	6,8	11,4	2,1	0,4	0,1	10,9	2,1	-	-
12.2021	72,7	5,3	31,0	4,8	1,6	0,1	1,3	0,1	0,3	0,1	3,9	0,5
01.2022	81,5	7,1	8,9	6,2	0,1	-	-	-	0,1	0,1	-	-
Загальне накопичення г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$			**65,2**	34,6	**64,6**	5,9	**13,8**	0,6	**50,8**	6,4	-	-
Загальне вивільнення, г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$			**-91,5**	24,4	-	-	-	-	-	-	**35,2**	4,3
Накопичення Pb у річному прирості деревини, г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$			**10,3**	0,9								
Запаси Pb у деревній фітомасі, г×га$^{-1}$			**1587**	137								
Запаси Pb у 0-5 см шарі ґрунту, г×га$^{-1}$			**14846**	5557								
Запаси Pb у 5-20 см шарі ґрунту, г×га$^{-1}$			**57264**	7771								

ферних опадів (50,8±6,4 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$) та 21% припадало на кількість металу, що надійшла у складі опалого листя (13,8±0,6 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$). Таким чином, основним шляхом надходження Pb до екосистеми НПП «Голосіївський» виступають процеси вологого осадження з атмосфери.

Сумарне вивільнення Pb з підстилки грабової діброви НПП «Голосіївський» протягом року оцінюється у 91,5±24,4 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$, що у 1,4 рази більше, ніж кількість накопиченого металу (65,2±34,6 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$). Загальні річні втрати Pb лісовою підстилкою перевищують його надходження на 26,3 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$. Аналіз балансу втрат металу з обсягами його надходженням за окремими місяцями показав, що лісова підстилка найбільш активно втрачає Pb протягом травня–липня, коли відбувається стрімке скорочення її запасів внаслідок процесів мінералізації. При цьому втрати Pb екосистемою з вертикальним стоком ґрунтових вод за рік становили 35,2±4,3 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$, що не покриває величину надходження металу у складі атмосферних опадів – 51±6 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$. Це свідчить про можливу затримку Pb у ґрунті у формі малорухомих сполук, що підтверджується суттєво вищою концентрацією металу у гумусовому та елювіальному шарах. Іншим механізмом накопичення Pb в екосистемі є його фіксація у складі річного приросту деревини, що становить 10±1 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$.

Величина загального накопичення Pb у лісовій підстилці грабової діброви Канівського природного заповідника за рік становила 22,0±3,8 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$ (табл. 3). Оцінка загальних втрат Pb підстилкою за рік дає близьку величину – 27,7±3,7 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$, що статистично значимо не відрізняється від показника загального накопичення металу. Це свідчить про збалансований стан функціонування біогеохімічної системи Pb грабової діброви Канівського природного заповідника, коли обсяги надходження металу до підстилки врівноважено процесами його вивільнення.

Розрахунок загального річного надходження Pb до екосистеми Канівського природного заповідника в результаті вологого осадження з атмосфери та листяним опадом дає величину 53,5±3,6 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$, з яких 93% припадає на вологе осадження у складі атмосферних опадів (49,6±3,0 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$). Кількість металу, що надійшла у складі опалого листя, становить лише 7% від обсягів надходження (3,9±0,6 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$). Порівняння величин вологого осадження Pb з атмосфери (46,9±3,0 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$) та ґрунтового стоку до елювіального шару ґрунту (56,1±6,3 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$) вказує на наявність балансу між надходженням та втратами металу екосистемою. Фіксація Pb у річному прирості деревної фітомаси грабу у загальному балансі металу в екосистемі є несуттєвою та становить 1,8±0,1 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$.

Обговорення

Співставлення величин потоків Pb в умовах модельних екосистем грабових дібров вказує, що величина загального надходження металу протягом року є подібною та становить для НПП «Голосіївський» 65 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$, для Канівського природного заповідника – 54 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$. Водночас, враховуючи, що основним шляхом вивільнення металу з екосистеми є ґрунтовий стік, в умовах НПП «Голосіївський» спостерігається незбалансованість біогеохімічного циклу Pb, коли втрати металу з ґрунтовою інфільтрацією неповністю покривають його надходження до екосистеми з атмосферними опадами (рис. 2). Інтенсивність потоку вертикальної міграції Pb ґрунтовими водами в екосистемі грабової діброви НПП «Голосіївський» є у 1,6 рази нижчою та становить 35 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$ проти 56 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$ у Канівському природному заповіднику. Це може призводити до затримки та накопичення Pb в екосистемі НПП «Голосіївський». Можна бачити, що у лісовій підстилці НПП «Голосіївський» запаси Pb становлять 65 г×га$^{-1}$, у Канівському природному заповіднику вони є у 3 рази меншими – 22 г×га$^{-1}$. При цьому сумарні запаси сполук металу у ґрунті модельних екосистем відрізняються лише у 1,2 рази: у НПП «Голосіївський» 72,1 кг×га$^{-1}$, у Канівському природному заповіднику – 57,0 кг×га$^{-1}$, що свідчить про головну роль лісової підстилки у накопиченні та регулювання міграції Pb в екосистемах грабових дібров Середнього Придніпров'я.

Основні відмінності досліджених екосистем були виявлені за параметрами накопичення Pb у фітомасі грабу. Запаси Pb у листяній фітомасі екосистеми грабової діброви НПП «Голосіївський» є вищими у 3,5 рази та оцінені у 14 г/га проти 4 г/га у Канівському природному заповіднику. Відмінності запасів у фітомасі деревини становили 2,4 рази – 1,6 кг/га та 0,7 кг/га відповідно. Як наслідок високого вмісту Pb у листяній фітомасі, в екосистемі НПП «Голосіївський» листяний опад має більш суттєвий внесок до потоку надходження Pb до лісової підстилки – 21%, ніж в умовах Канівського природного запо-

Таблиця 3

Баланс обсягів надходження та вивільнення Pb у структурі біогеохімічного циклу екосистеми грабової діброви Канівського природного заповідника

Місяць	**Запас Pb, г×га$^{-1}$**		**Накопичення підстилкою/ вивільнення Pb з підстилки, г×га$^{-1}$**		**Сумарне надходження Pb (листяний опад + атмосферні опади), г×га$^{-1}$**		**Надходження Pb з листяним опадом, г×га$^{-1}$**		**Надходження Pb з атмосферними опадами, г×га$^{-1}$**		**Ґрунтовий стік Pb, г×га$^{-1}$**	
	X	**SD**	**X**	**SD**	**X**	**X**	**SD**	**SD**	**X**	**SD**	**X**	**SD**
06.2022	27,9	3,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
07.2022	26,4	4,5	-1,5	4,2	3,7	0,5	0,1	0,0	3,5	0,4	7,2	0,8
08.2022	16,2	4,1	-10,2	4,3	4,6	0,6	0,4	0,0	4,2	0,5	-	-
09.2022	18,7	4,2	2,5	4,2	3,0	0,4	0,6	0,1	2,3	0,3	19,9	2,2
10.2022	26,8	3,9	8,1	4,0	4,5	0,6	1,3	0,2	3,3	0,4	-	-
11.2022	36,5	3,0	9,7	3,4	4,9	0,6	0,9	0,2	4,0	0,5	11,2	1,3
12.2022	36,2	4,8	-0,3	3,9	5,0	0,6	0,5	0,1	4,4	0,5	13,3	1,5
01.2023	34,8	5,3	-1,4	5,1	2,6	0,3	-	-	2,6	0,3	-	-
02.2023	34,2	4,0	-0,6	4,7	4,1	0,5	-	-	4,1	0,5	-	-
03.2023	36,0	3,2	1,8	3,6	2,5	0,3	-	-	2,5	0,3	-	-
04.2023	35,8	3,0	-0,1	3,1	3,9	0,5	-	-	3,9	0,5	-	-
05.2023	34,6	4,5	-1,2	3,7	5,9	0,7	-	-	5,9	0,7	4,5	0,5
06.2023	28,9	4,4	-5,7	4,4	4,9	0,6	-	-	4,9	0,6	-	-
07.2023	21,6	3,7	-7,3	4,0	3,9	0,5	-	-	3,9	0,5	-	-
Загальне накопичення г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$			**22,0**	3,8	**53,5**	3,6	**3,9**	0,6	**49,6**	3,0	-	-
Загальне вивільнення, г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$			**-27,7**	3,7	-	-	-	-	-	-	**56,1**	6,3
Накопичення Pb у річному прирості деревини, г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$			**1,8**	0,1								
Запаси Pb у деревній фітомасі, г×га$^{-1}$			**655,0**	15,4								
Запаси Pb у 0-5 см шарі ґрунту, г×га$^{-1}$			**11777**	1282								
Запаси Pb у 5-20 см шарі ґрунту, г×га$^{-1}$			**45222**	10119								

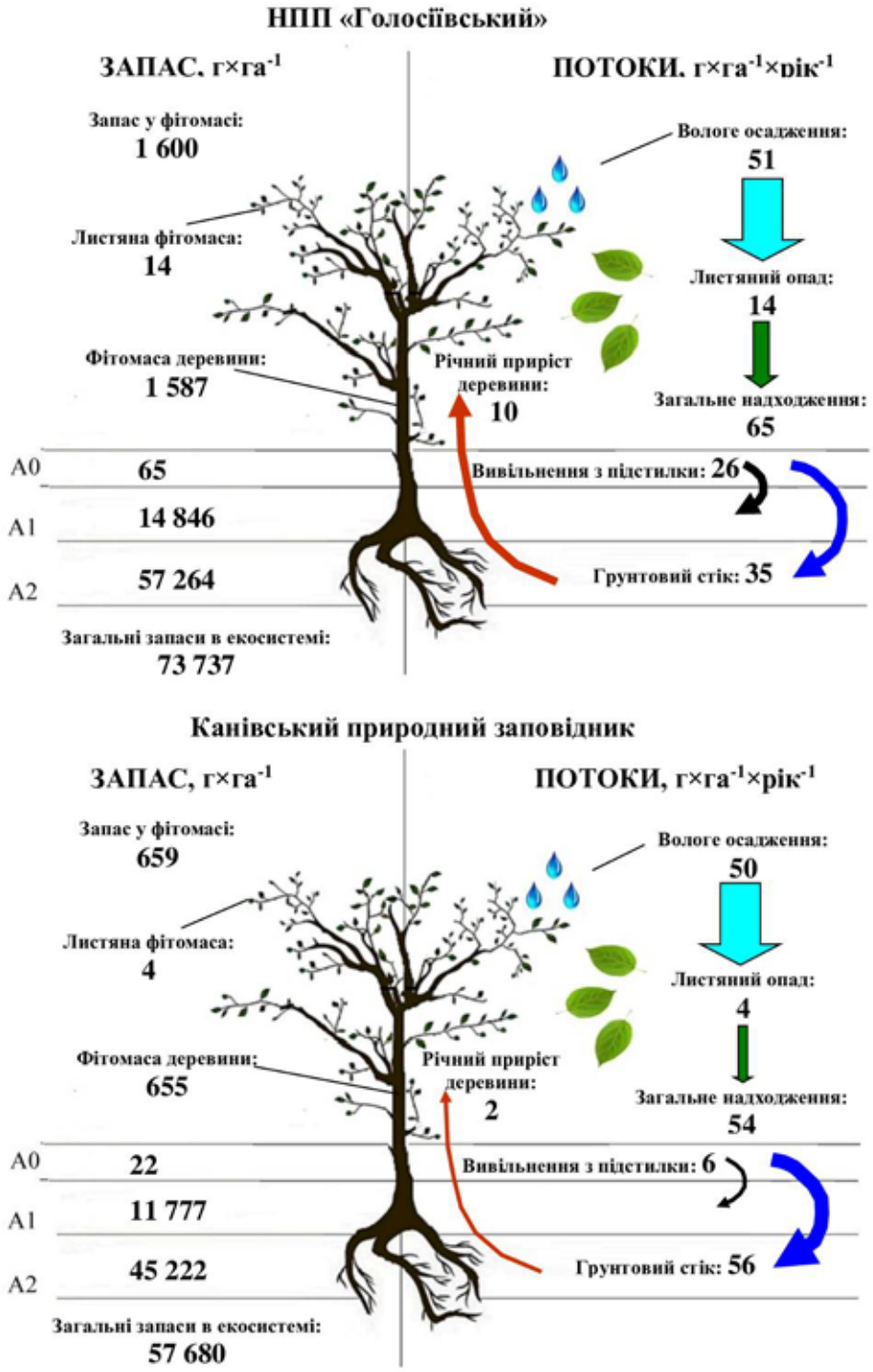


Рис. 2. Схема біогеохімічного циклу Pb в екосистемах грабових дібров НПП «Голосіївський» та Канівського природного заповідника

відника, де його внесок забезпечує надходження 7% від загальної кількості металу. Таким чином, у функціонуванні біогеохімічного циклу Pb в умовах НПП «Голосіївський» більш суттєву роль відіграє біологічна складова у вигляді процесів акумуляції сполук металу у листяній фітомасі (як в результаті кореневого поглинання з ґрунту, так і атмосферного осадження на поверхню листя), його надходження до лісової підстилки у складі листяного опаду та подальшого накопичення Pb у деревині. Все це свідчить не лише про підвищений вміст Pb у компонентах лісової екосистеми НПП «Голосіївський», а й про доступність сполук Pb для рослин, що створює небезпеку виникнення фітотоксичних

ефектів для головної деревної породи грабової діброви НПП «Голосіївський» (Риженко, 2018; Maksimtsev et al., 2021).

В умовах грабової діброви Канівського природного заповідника, незважаючи на близькі величини сумарного надходження сполук Pb, можна бачити, що біологічна складова біогеохімічного циклу є несуттєвою, а основний потік металу відбувається в системі «атмосфера-ґрунт-підстилка-ґрунтові води». Причому основним шляхом надходження Pb також виступають атмосферні опади, які забезпечують формування 93% загального потоку металу до екосистеми, що було показано для інших лісових екосистем Європи (Kim & Fergusson, 1994; Laskowski et al., 1995; Virzo et al., 2002). Слід відмітити, що в умовах екосистеми НПП «Голосіївський» вологе осадження у складі атмосферних опадів забезпечувало надходження до екосистеми близької кількості металу, що може свідчити про однакові регіональні особливості хімічного складу атмосферних опадів. У результаті можна зробити висновок, що біогеохімічний цикл екосистеми грабової діброви Канівського природного заповідника є збалансованим, коли обсяги надходження металу до екосистеми врівноважено потоками його втрати в результаті вертикального стоку з ґрунтовими водам. При цьому накопичення Pb у фітомасі габу є несуттєвим, що свідчить про стійкість екосистеми грабової діброви Канівського природного заповідника до впливу атмосферного забруднення.

Висновки

Встановлено, що вертикальний розподіл Pb по ґрунтових горизонтах характеризується відсутністю суттєвих відмінностей вмісту у гумусовому та елювіальному шарах. При цьому сумарні запаси у ґрунті екосистеми НПП «Голосіївський» були вищими у 1,2 рази та становили 72,1 кг×га$^{-1}$, у Канівському природному заповіднику – 57,0 кг×га$^{-1}$. Співставлення величин потоків Pb в умовах модельних екосистем грабових дібров вказує, що загальне надходження металу до екосистеми суттєво не відрізняється та становить для НПП «Голосіївський» 65 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$, для Канівського природного заповідника – 54 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$. Водночас частка Pb, що надходить з листяним опадом в умовах НПП «Голосіївський», становить 21%. В умовах Канівського природного заповідника на внесок листяного опаду припадає лише 7%. У результаті втрати Pb екосистемою НПП «Голосіївський» з вертикальним стоком ґрунтових вод за рік становили 35,2±4,3 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$, що не покриває обсягів надходження металу у складі атмосферних опадів – 51±6 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$ та свідчить про незбалансованість його біогеохімічного циклу. В умовах Канівського природного заповідника потік вологого осадження Pb з атмосферними опадами становить 46,9±3,0 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$, що врівноважено величиною потоку вертикального ґрунтового стоку – 56,1±6,3 г×га$^{-1}$×рік$^{-1}$ та вказує на наявність балансу між надходженням та втратами металу екосистемою.

Подяки

Дослідження частково виконано в рамках стажування за програмою DAAD Programme Eastern Partnership на тему “Various approaches of phytoremediation of contaminated soils and water bodies by ferns and higher plants”. Автори висловлюють подяку професорці Ютті Паппенброк та дослідницькій групі лабораторії Метаболізму сірки та абіотичного стресу Інституту ботаніки Ганноверського університету імені Лейбніца за їхню підтримку та співпрацю під час проведення дослідження. Також автори висловлюють щиру вдячність за можливість проведення досліджень адміністрації НПП «Голосіївський», а саме заступнику директора з науково-дослідної роботи к.б.н. Олені Прядко та начальнику відділу еколого-освітньої роботи Сергію Харі. Автори дякують за допомогу у щомісячному відборі зразків науковому співробітнику Канівського природного заповідника к.б.н. Василю Шевчику та начальнику відділу еколого-освітньої роботи PhD Миколі Борисенку.

Список використаної літератури

Воробйов Є.О., Любченко В.М., Соломаха В.М., Орлов О.О. Класифікація грабових лісів України. Київ : Фітосоціоцентр, 2008. 252 с.

Єгорова Т.М. Фоновий вміст важких металів та його екологічна інформативність у ґрунтах ландшафтів зони Українського Полісся. *Агрохімія та ґрунтознавство.* 2014. Т. 81. С. 65–72. [Електронний ресурс]. URL: http://agrosoil.yolasite.com/resources/2014_AIG_81_pp65-72.pdf (дата звернення 26.08.2024).

Клос В.Р., Бірке М., Жовинський Е.Я., Акінфієв Г.О., Амашукелі Ю.А., Кламенс Р. Регіональні геохімічні дослідження ґрунтів України в рамках міжнародного проекту з геохімічного карту-

вання сільськогосподарських та пасовищних земель Європи (GEMAS). *Пошукова та екологічна геохімія.* 2012. Т. 1. С. 51–66.

Набиванець Б.І., Сухан В.В., Калабіна Л.В. Аналітична хімія природного середовища. К. : Либідь, 1996. 304 с.

Риженко Н.О. Наукові основи фітотоксикологічної оцінки небезпечності металів (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn) у екосистемах: автореф. дис. … докт. біол. наук: 03.00.16. Київ, 2018. 40 с.

Самчук А.І., Кураєва І.В., Гродзинська Г.А., Вовк К.В., Войтюк Ю.Ю., Злобіна К.С., Стадник Т.В., Огар В.О., Небесний В.Б., Гончар Г.Ю. Важкі метали в об'єктах довкілля Київського мегаполісу Київ : Наш формат, 2019. 164 с.

Chen L., Liu C., Zou R., Yang M., Zhang Z. Experimental examination of effectiveness of vegetation as bio-filter of particulate matters in the urban environment. *Environmental Pollution.* 2016. Vol. 208. P. 198–208. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.09.006.

Connan O., Maro D., Hébert D., Roupsard P., Goujon R., Letellier B., Le Cavelier S. Wet and dry deposition of particles associated metals (Cd, Pb, Zn, Ni, Hg) in a rural wetland site, Marais Vernier, France. *Atmospheric Environment.* 2013. Vol. 67. P. 394–403. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.029.

Conti M.E., Iacobucci M., Cecchetti G. A statistical approach applied to trace metal data from biomonitoring studies. *International Journal of Environment and Pollution.* 2005. Vol. 23. P. 29–41. https://doi.org/10.1504/IJEP.2005.006394.

Diener A., Mudu P. How can vegetation protect us from air pollution? A critical review on green spaces' mitigation abilities for air-borne particles from a public health perspective - with implications for urban planning. *Science of The Total Environment.* 2021. Vol. 796. 148605. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148605.

Guidance for comparing background and chemical concentrations in soil for CERCLA sites. EPA 540-R-01-003 OSWER 9285.7-41. *Washington: Office of Emergency and Remedial Response.* [Електронний ресурс]. URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-11/documents/background.pdf (дата звернення 26.08.2024).

Halasz G.E., Árgyelan J. T., Horvath M. K. Phytoremediation of potential toxic tlements by native tree species in mined-spoiled soils in Mátraszentimre, Hungary. *Journal of Environmental Science and Management.* 2022. Vol. 25. P. 51–62. https://doi.org/10.47125/jesam/2022_2/06.

Hůnová I., Kurfürst P., Schreiberová M., Vlasáková L., Škáchová H. Atmospheric Deposition of Lead and Cadmium in a Central European Country over the Last Three Decades. *Atmosphere*, 2023. Vol. 14. 19. https://doi.org/10.3390/atmos14010019.

Kaszala R., Bárány-Kevei I., Polyák-Földi K. Heavy metal content of the vegetation on karstic soils. *Acta Climatologica et Chorologica.* 2003. Vol. 36. P. 57–62. https://doi.org/10.1007/0-387-23079-3_13.

Kim N.D., Fergusson J.E. Seasonal variations in the concentrations of cadmium, copper, lead and zinc in leaves of the horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.). *Environmental Pollution.* 1994. Vol. 86. P. 89–97. https://doi.org/10.1016/0269-7491(94)90010-8.

Laskowski R., Berg B. Dynamics of some mineral nutrients and heavy metals in decomposing forest litter. *Scandinavian Journal of Forest Research.* 1993. Vol. 8. P. 446–456. https://doi.org/10.1080/02827589309382791.

Laskowski R., Niklińska M., Maryański M. The Dynamics of Chemical Elements in Forest Litter. *Ecology.* 1995. Vol. 76. P. 1393–1406. https://doi.org/10.2307/1938143.

Lawson N.M., Mason R.P. Concentration of mercury, methylmercury, cadmium, lead, arsenic, and selenium in the rain and stream water of two contrasting watersheds in western Maryland. *Water Research.* 2001. Vol. 35. P. 4039–4052. https://doi.org/10.1016/s0043-1354(01)00140-3.

Makowski V., Julich S., Feger K., Breuer L., Julich D. Leaching of dissolved and particulate phosphorus via preferential flow pathways in a forest soil: An approach using zero-tension lysimeters. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science.* 2020. Vol. 183. P. 238–247. https://doi.org/10.1002/jpln.201900216.

Maksimtsev S., Dudarets S., Yukhnovskyi V. Accumulation of heavy metals in soil and litter of roadside plantations in Western Polissia of Ukraine. *Folia Forestalia Polonica, Series A.* 2021. Vol. 63. P. 232–242. https://doi.org/10.2478/ffp-2021-0024.

Montemagno A., Hissler C., Bense V., Teuling A. J., Ziebel J., Pfister L. Dynamics of rare earth elements and associated major and trace elements during Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) and European beech (*Fagus sylvatica L.*) litter degradation. *Biogeosciences.* 2022. Vol. 19. P. 3111–3129. https://doi.org/10.5194/bg-19-3111-2022.

Percy K.E., Ferretti M. Air pollution and forest health: toward new monitoring concepts. *Environmental Pollution.* 2004. Vol. 130. P. 113–126. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2003.10.034.

Piczak K., Leśniewicz A., Zyrnicki W. Metal concentrations in deciduous tree leaves from urban areas in Poland. *Environmental Monitoring and Assessment.* 2003. Vol. 86. P. 273–287. https://doi.org/10.1023/a:1024076504099.

Scheid S., Gunthardt-Goerg M. S., Schulin R., Nowack B. Accumulation and solubility of metals during leaf litter decomposition in non-polluted and polluted soil. *European Journal of Soil Science.* 2009. Vol. 60. P. 613–621. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01153.x.

Schmidt J.P., Henry L. Water and Bromide Recovery in Wick and Pan Lysimeters under Conventional and Zero Tillage. *Communications in Soil Science and Plant Analysis.* 2008. Vol. 39. P. 108–123. https://doi.org/10.1080/00103620701759053.

Schreck E., Foucault Y., Sarret G., Sobanska S., Cécillon L., Castrec-Rouelle M., Uzu G., Dumat C. Metal and metalloid foliar uptake by various plant species exposed to atmospheric industrial fallout: Mechanisms involved for lead. *Science of the Total Environment.* 2012. Vol. 427–428. P. 253–262. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.051.

Shahid M., Dumat C., Khalid S., Schreck E., Xiong T., Khan N. N. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of Hazardous Materials.* 2017. Vol. 325. P. 36–58. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.063.

Tisserand R., Van der Ent A., Nkrumah P., Didier S., Sumail S., Morel J.-L., Echevarria G. Nickel stocks and fluxes in a tropical agromining 'metal crop' farming system in Sabah (Malaysia). *Science of The Total Environment.* 2024. Vol. 919. P. 170691. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170691.

Turcios A., Papenbrock J., Tränkner M. Potassium, an important element to improve water use efficiency and growth parameters in quinoa (Chenopodium quinoa) under saline conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science.* 2021. Vol. 207. P. 618–630. https://doi.org/10.1111/jac.12477.

Tyler G., Olsson T. The importance of atmospheric deposition, charge and atomic mass to the dynamics of minor and rare elements in developing, ageing, and wilted leaves of beech (Fagus sylvatica L.). *Chemosphere.* 2006. Vol. 65. P. 250–260. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.02.051.

Virzo De Santo A., Fierro A., Berg B., Rutiglianoc F. A. De Marco A. Heavy metals and litter decomposition in coniferous forests. *Developments in Soil Science.* 2002. Vol. 28, P. 63–78. https://doi.org/10.1016/S0166-2481(02)80044-7.

References

Vorobyov, E.O., Lyubchenko, V.M., Solomakha, V.M., & Orlov, O.O. (2008). Klasyfikatsiya hrabovykh lisiv Ukrayiny [Classification of hornbeam forests of Ukraine]. Kyiv : Phytosocial Center [in Ukrainian].

Yehorova, T.M. (2014). Fonovyy vmist vazhkykh metaliv ta yoho ekolohichna informatyvnist′ u hruntakh landshaftiv zony Ukrayins′koho Polissya. [The background content of heavy metals and its ecological informativeness in the soils of the landscapes of the Ukrainian Polissia]. *Ahrokhimiya ta hruntoznavstvo [Agrochemistry and soil science],* 81, 65–72. [Electronic resource] URL: http://agrosoil.yolasite.com/resources/2014_AIG_81_pp65-72.pdf (access date 28.08.2024) [in Ukrainian].

Klos, V.R., Birke, M., Zhovyns′kyy, E.Ya., Akinfiyev, H.O., Amashukeli, Yu.A., & Klamens, R. (2012). Rehional′ni heokhimichni doslidzhennya gruntiv Ukrayiny v ramkakh mizhnarodnoho proektu z heokhimichnoho kartuvannya sil′s′kohospodars′kykh ta pasovyshchnykh zemel′ Yevropy (GEMAS) [Regional geochemical studies of Ukrainian soils within the framework of the international project on geochemical mapping of agricultural and pasture lands of Europe (GEMAS)]. *Poshukova ta ekolohichna heokhimiya [Exploration and Environmental Geochemistry],* 1, 51–66 [in Ukrainian].

Nabivanets, B.I., Sukhan, V.V., & Kalabina, L.V. (1996). Analitychna khimiya pryrodnoho seredovyshcha [Analytical chemistry of the natural environment]. Kyiv : Lybid [in Ukrainian].

Ryzhenko, N. (2018). Naukovi osnovy fitotoksykolohichnoyi otsinky nebezpechnosti metaliv (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn) u ekosystemakh [Scientific principles of phytotoxicological assessment of metals hazard (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn) in ecosystems]. *Extended abstract of Doctor's thesis.* Kyiv. 40 p. [in Ukrainian].

Samchuk, A.I., Kuraeva, I.V., Grodzinska, G.A., Vovk, K.V., Voytyuk, Y.Yu., Zlobina, K.S., Stadnyk, T.V., Ogar, V.O., Nebesnyi, V.B., & Gonchar, G.Yu. (2019). Vazhki metaly v ob`yektakh

dovkillya Kyyivs`koho mehapolisu [Heavy metals in the objects of the environment of the Kyiv metropolis]. Kyiv : Nash format [in Ukrainian].

Chen, L., Liu, C., Zou, R., Yang, M., & Zhang Z. (2016). Experimental examination of effectiveness of vegetation as bio-filter of particulate matters in the urban environment. *Environmental Pollution*, 208, 198–208. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.09.006 [in English].

Connan, O., Maro, D., Hébert, D., Roupsard, P., Goujon, R., Letellier, B., & Le Cavelier, S. (2013). Wet and dry deposition of particles associated metals (Cd, Pb, Zn, Ni, Hg) in a rural wetland site, Marais Vernier, France. *Atmospheric Environment*, 67, 394–403. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.029 [in English].

Conti, M.E., Iacobucci, M., & Cecchetti, G. (2005). A statistical approach applied to trace metal data from biomonitoring studies. *International Journal of Environment and Pollution*, 23 (1), 29–41. https://doi.org/10.1504/IJEP.2005.006394 [in English].

Diener, A., & Mudu, P. (2021). How can vegetation protect us from air pollution? A critical review on green spaces' mitigation abilities for air-borne particles from a public health perspective – with implications for urban planning. *Science of The Total Environment*, 796, 148605. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148605 [in English].

Guidance for comparing background and chemical concentrations in soil for CERCLA sites (2002). EPA 540-R-01-003 OSWER 9285.7–41. Washington: Office of Emergency and Remedial Response. [Electronic resource] URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-11/documents/background.pdf (access date 28.08.2024) [in English].

Halasz, G.E., Árgyelan, J.T., & Horvath, M.K. (2022). Phytoremediation of potential toxic tlements by native tree species in mined-spoiled soils in Mátraszentimre, Hungary. *Journal of Environmental Science and Management*, 25 (2), 51–62. https://doi.org/10.47125/jesam/2022_2/06 [in English].

Hůnová, I., Kurfürst, P., Schreiberová, M., Vlasáková, L., & Škáchová, H. (2023). Atmospheric Deposition of Lead and Cadmium in a Central European Country over the Last Three Decades. *Atmosphere*, 14 (1), 19. https://doi.org/10.3390/atmos14010019 [in English].

Kaszala, R., Bárány-Kevei, I., & Polyák-Földi, K. (2003). Heavy metal content of the vegetation on karstic soils. *Acta Climatologica et Chorologica*, 36 (37), 57–62. https://doi.org/10.1007/0-387-23079-3_13 [in English].

Kim, N.D., & Fergusson, J.E. (1994). Seasonal variations in the concentrations of cadmium, copper, lead and zinc in leaves of the horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.). *Environmental Pollution*, 86 (1), 89–97. https://doi.org/10.1016/0269-7491(94)90010-8 [in English].

Laskowski, R., & Berg, B. (1993). Dynamics of Some Mineral Nutrients and Heavy Metals in Decomposing Forest Litter. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 8, 446–456. https://doi.org/10.1080/02827589309382791 [in English].

Laskowski, R., Niklińska, M., & Maryański, M. (1995). The Dynamics of Chemical Elements in Forest Litter. *Ecology*, 76 (5), 1393–1406. https://doi.org/10.2307/1938143 [in English].

Lawson, N.M., & Mason, R.P. (2001). Concentration of mercury, methylmercury, cadmium, lead, arsenic, and selenium in the rain and stream water of two contrasting watersheds in western Maryland, *Water Research*, 35, 4039–4052. https://doi.org/10.1016/s0043-1354(01)00140-3 [in English].

Makowski, V., Julich, S., Feger, K., Breuer, L., & Julich, D. (2020). Leaching of dissolved and particulate phosphorus via preferential flow pathways in a forest soil: An approach using zero-tension lysimeters. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 183, 238–247. https://doi.org/10.1002/jpln.201900216 [in English].

Maksimtsev, S., Dudarets, S., & Yukhnovskyi, V. (2021). Accumulation of heavy metals in soil and litter of roadside plantations in Western Polissia of Ukraine. *Folia Forestalia Polonica, Series A*, 63 (3), 232–242. https://doi.org/10.2478/ffp-2021-0024 [in English].

Montemagno, A., Hissler, C., Bense, V., Teuling, A.J., Ziebel, J., & Pfister, L. (2022). Dynamics of rare earth elements and associated major and trace elements during Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) litter degradation. *Biogeosciences*, 19, 3111–3129. https://doi.org/10.5194/bg-19-3111-2022 [in English].

Percy, K.E., & Ferretti, M. (2004). Air pollution and forest health: toward new monitoring concepts. *Environmental Pollution*, 130 (1), 113–126. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2003.10.034 [in English].

Piczak, K., Leśniewicz, A., & Zyrnicki, W. (2003) Metal concentrations in deciduous tree leaves from urban areas in Poland. *Environmental Monitoring and Assessment*, 86 (3), 273–287. https://doi.org/10.1023/a:1024076504099 [in English].

Scheid, S., Gunthardt-Goerg, M.S., Schulin, R., & Nowack, B. (2009). Accumulation and solubility of metals during leaf litter decomposition in non-polluted and polluted soil. *European Journal of Soil Science*, 60, 613–621. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01153.x [in English].

Schmidt, J.P., & Henry, L. (2008). Water and Bromide Recovery in Wick and Pan Lysimeters under Conventional and Zero Tillage. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39 (1–2), 108–123. https://doi.org/10.1080/00103620701759053 [in English].

Schreck, E., Foucault, Y., Sarret, G., Sobanska, S., Cécillon, L., Castrec-Rouelle, M., Uzu, G., & Dumat, C. (2012). Metal and metalloid foliar uptake by various plant species exposed to atmospheric industrial fallout: Mechanisms involved for lead, *Science of the Total Environment*, 427–428, 253–262. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.051 [in English].

Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Schreck, E., Xiong, T., & Khan, N.N. (2017). Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of Hazardous Materials*, 325, 36–58. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.063 [in English].

Tisserand, R., Van der Ent, A., Nkrumah, P., Didier, S., Sumail, S., Morel, J.-L., & Echevarria, G. (2024). Nickel stocks and fluxes in a tropical agromining 'metal crop' farming system in Sabah (Malaysia). *Science of The Total Environment*, 919, 170691. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170691 [in English].

Turcios, A., Papenbrock, J., & Tränkner, M. (2021). Potassium, an important element to improve water use efficiency and growth parameters in quinoa (*Chenopodium quinoa*) under saline conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207 (4), 618–630. https://doi.org/10.1111/jac.12477 [in English].

Tyler, G., & Olsson, T. (2006). The importance of atmospheric deposition, charge and atomic mass to the dynamics of minor and rare elements in developing, ageing, and wilted leaves of beech (*Fagus sylvatica* L.). *Chemosphere*, 65 (2), 250–260. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.02.051 [in English].

Virzo De Santo, A., Fierro, A., Berg, B., Rutiglianoc, F.A., & De Marco, A. (2002). Heavy metals and litter decomposition in coniferous forests. *Developments in Soil Science,* 28 (A), 63–78. https://doi.org/10.1016/S0166-2481(02)80044-7 [in English].

Отримано: 19.09.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

УДК 502.173:556.51:574.5
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.22

ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ПОВЕРХНЕВИХ ВОД БАСЕЙНУ РІЧКИ ЗГАР

О. В. Мудрак[1], В. В. Клочанюк[2]

У статті подана екологічна оцінка якості поверхневих вод басейну річки Згар, площею 1170 км², що належить до басейну річки Південний Буг площею 65,1 тис. км² (11,1% території України), який за адміністративно-територіальним поділом включає Хмельницьку і Вінницьку області, яка є одним із важливих об'єктів екологічної та Смарагдової мережі. Екологічна оцінка поверхневих вод басейну річки Згар встановлена на основі польових досліджень, а також основних статистичних даних Басейнового управління водних ресурсів річки Південний Буг. Визначено джерела антропогенного навантаження на якість поверхневих вод басейну річки Згар та означено види і джерела забруднення води басейну річки. Оцінка екологічного стану проводилася на основі досліджуваних хімічних показників води у створах, що просторово розміщені по довжині басейну річки Згар. Проаналізовано динаміку основних гідрохімічних показників у басейні річки Згар впродовж 2021–2023 рр. Встановлено індекс забрудненості води, модифікований індекс забрудненості води, коефіцієнт забрудненості води та визначена якісна оцінка ступеня забрудненості за відповідними формулами, враховуючи певні критерії оцінки якості поверхневих вод. Проведено еколого-порівняльний аналіз концентрацій певних показників якості поверхневих вод у відібраних створах. Визначено оцінку якості води басейну річки Згар за дев'ятнадцятими показниками. Досліджено вплив природних і антропогенних чинників на формування хімічного складу і якості поверхневих вод басейну річки Згар. Встановлена якість води за двома показниками ІЗВ та коефіцієнта забрудненості х за трирічний період свідчать про негативний антропогенний вплив на басейн річки Згар. Це сприяє погіршенню його екологічного стану.

Ключові слова: *екологічна оцінка, якість води, басейн річки, гідрохімічні показники, джерела забруднення.*

[1] доктор сільськогосподарських наук, професор,
завідувач кафедри екології, природничих та математичних наук
(Комунальний заклад вищої освіти «Вінницька академія безперервної освіти», м. Вінниця)
e-mail: ov_mudrak@ukr.net
ORCID: 0000-0002-1776-6120
[2] аспірантка Відділу охорони ландшафтів, збереження біорізноманіття і природозаповідання
(Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ)
e-mail: vikaklochanuyk@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4550-2085

ECOLOGICAL ASSESSMENT OF SURFACE WATERS OF THE ZGAR RIVER BASIN

O. V. Mudrak, V. V. Klochaniuk

The article presents an ecological assessment of the quality of surface waters in the 1170 km² Zgar River basin, which belongs to the 65.1 thousand km² Southern Bug River basin (11.1% of the territory of Ukraine), which includes Khmelnytsky and Vinnytsia regions, and is one of the important sites of the Ecological and Emerald Network. The ecological assessment of the surface waters of the Zgar River basin was established on the basis of field studies and basic statistical data of the Southern Bug River Basin Water Resources Management. The sources of anthropogenic pressure on the quality of surface waters in the Zgar River basin were identified, and the types and sources of water pollution in the river basin were identified. The assessment of the ecological state was carried out on the basis of the studied chemical parameters of water in the gauges spatially located along the length of the Zgar River basin. The dynamics of the main hydrochemical indicators in the Zgar River basin during 2021-2023 was analyzed. The water pollution index, modified water pollution index, water pollution coefficient were established and a qualitative assessment of the degree of pollution was determined using the appropriate formulas, taking into account certain criteria for assessing the quality of surface water. An ecological and comparative analysis of the concentrations of certain indicators of surface water quality in the selected streams was carried out. The water quality of the Zgar River basin was assessed by nineteen indicators. The influence of natural and anthropogenic factors on the formation of the chemical composition and quality of surface waters in the Zgar River basin was studied. The established water quality according to two indicators of the COI and the pollution coefficient x for a three-year period indicates a negative anthropogenic impact on the Zgar River basin. This contributes to the deterioration of its ecological state.

Key words: *environmental assessment, water quality, river basin, hydrochemical indicators, sources of pollution.*

Вступ

Малі річки тісно пов'язані з економікою сусідніх регіонів і відіграють важливу роль у соціальному та екологічному розвитку місцевих громад. Водночас, екстенсивне використання біологічних ресурсів малих річок, зарегулювання, зрошення та господарсько-побутовий водозабір руйнують природний стан малих річок та погіршують екологічний стан їх басейнів. Річки стали більш пласкими, мілководними, забрудненими, з низькою якістю води та відсутністю водної флори і фауни. Надмірно інтенсивне використання річок і водозборів у народному господарстві руйнує природний гідрохімічний і водно-біологічний режим річок, зменшує їх об'єм і глибину, призводить до замулення, заростання та евтрофікації річок через відкладення сполук азоту, фосфору і калію (Мудрак та ін., 2022).

В процесі розвитку цивілізації та росту чисельності населення використання природних ресурсів невпинно зростає, а особливо водних. Аналіз антропогенних факторів впливу на показники якості води – одне з пріоритетних завдань екології, яке передбачає отримання достовірної та точної інформації про стан водойм, що використовуються людиною для технічних цілей, про основні проблеми галузі електроенергетики, пов'язані з локальним антропогенним впливом на водні об'єкти. Повнота інформації дозволяє розробити теоретичні та практичні рекомендації та проєкти покращення сучасного стану водойми і попередження майбутнього негативного впливу, що призведе до деструктивних змін. На сьогоднішній день використання річкових екосистем продовжує носити екстенсивний, руйнівний для них характер.

Наразі зростає занепокоєння екологічним станом малих річок, оскільки економічне навантаження на навколишнє середовище та річкові водозбори збільшується. Взагалі це – закономірний, економічно і соціально обумовлений історичний процес, який потребує постійного вивчення і регулювання.

Екологічний стан басейну річки Згар, площею 1170 км², що належить до басейну річки Південний Буг, площею 65,1 тис. км² (11,1% території України), який за адміністративно-територіальним поділом включає Хмельницьку і Вінницьку області, формують малі річки, що складають 60% його стоку. Це динамічні природні і природно-антропогенні екосистеми, гідрологічний, гідробіологічний і гідрохімічний режими яких значною

мірою визначаються їхніми водозаборами, що потребують особливої уваги, диференційованого підходу і охорони (Васенко та ін., 2006).

Беручи до уваги Водну рамкову директиву ЄС, можна помітити, що інтерес до малих річок помітно зріс. Це пов'язано з тим, що малі річки виконують важливі природоутворюючі, санітарно-гігієнічні, рекреаційні та екологічні функції. Малі річки складають основу гідрографічної мережі басейну річки Згар і слугують джерелом енергії для зрошення полів, риборозведення, водопостачання, водопою тварин, птахівництва, технологічних потреб і, зокрема, енергетичних потреб сільського населення. Тому вона є першим джерелом забруднення, відкладення осаду, виснаження та деградації. Наукові дослідження екологічного стану малих річок басейну річки Згар показали, що багато з них перебувають у незадовільному, а подекуди й катастрофічному стані. (Бірюков, 2014; Васенко та ін., 2017).

Басейни малих річок є індикаторами стану довкілля і визначаються рівнем антропогенного навантаження, якому піддаються компоненти довкілля (повітря, поверхневі та підземні води, ґрунтовий покрив, рослинний і тваринний світ та ландшафт в цілому). У цьому контексті дослідження змін якості поверхневих вод під впливом антропогенного навантаження в басейні річки Згар набувають особливого значення. У зв'язку з цим особливої актуальності набувають дослідження зміни якості поверхневих вод басейну річки Згар під впливом антропогенного навантаження.

Велике наукове і практичне значення мають роботи вітчизняних вчених, які займалися дослідженнями басейнів малих річок: А.М. Янголя, В.П. Кубишкіна, Д.А. Тютюнника, В.Р. Булдея, О.В. Скрипника, В.Є. Алексєєвського, П.І. Коваленка, В.С. Мошинського, Г.С. Потоцького, М.І. Ромащенка, С.А. Балюка, Й.М. Білоуса, А.І. Бондаря, М.Д. Будза, С.Т. Вознюка, М.О. Клименка, С.І. Веремеєнка, Г.П. Рябцевої, І.Т. Слюсаря, Р.С. Трускавецького, В.В. Фалюша, О.В. Цвєтової, М.Й. Шевчука, А.В. Яцика, Сніжка С.І., Хільчевського В.К., Романенка В.Д. та ін.

Незважаючи на те, що проведено багато досліджень впливу меліорації на екологічний стан меліорованих земель та прилеглих територій, ця проблема зростає у зв'язку з виникненням природних і соціальних екологічних проблем, пов'язаних зі збільшенням антропогенного тиску на природні комплекси.

Кількість екологічних проблем у природі та суспільстві, пов'язаних зі збільшенням антропогенного навантаження на природні комплекси, неухильно зростає.

Крім того, малі річки та струмки є найбільш вразливими до антропогенного впливу. Багато вчених підкреслюють, що знищення природної рослинності та агресивна культивація ґрунтів посилюють процеси ерозії і відкладення на водозборі та підвищують інтенсивність рівнинного стоку. В.Н. Голосов та Н.Н. Іванова проаналізували природні та антропогенні фактори, що впливають на деградацію водозбірних басейнів.

На думку дослідників, які проаналізували природні та антропогенні фактори, що впливають на деградацію водотоків, максимальна площа оброблюваних земель, яка не призводить до порушення нормального функціонування екосистеми, становить 20% від площі водозбору. В результаті великомасштабного землеробства до руслового потоку додається більше твердих речовин, і малі річки не в змозі їх транспортувати, що призводить до відкладення осаду, замулення та погіршення якості води в руслах малих річок.

Мета наших досліджень полягала у визначенні екологічної оцінки поверхневих вод басейну річки Згар на основі проведених досліджень за встановленими показниками.

Матеріал і методи

Для оцінки якості поверхневих вод у водозборі річки Згар були використані рекомендовані оцінки хімічного складу води, включаючи індекс забруднення води (ІЗВ), модифікований ІЗВ та коефіцієнт забруднення χ (Набиванець та ін., 2013).

Індекс забруднення води оцінює якість води за шістьма показниками. Наразі використовуються два методи розрахунку – традиційний та модифікований: ІЗВ використовує наступні показники: NH4+, NO2-, нафтопродукти, феноли, O2 та БСК5; модифікований ІЗВ включає два базові компоненти: модифікований ІЗВ включає два базові компоненти – БСК5 та O2, при цьому останні чотири компоненти обираються за ГДК, обраною за максимальним співвідношенням їх концентрацій до ГДК (Мудрак та ін., 2022).

Розраховується ІЗВ за формулою:

$$ІЗВ = \frac{1}{6}\sum\frac{Сі}{ГДКі} \quad (1)$$

де Сі – середнє значення концентрації і-го показника;

ГДКі – гранично допустима концентрація і-го показника.

Оцінка якості води виконується за наступними класами (табл. 1).

Коефіцієнт забрудненості χ розраховується за формулою (2), наведеною у (Набиванець та ін., 2013)

$$x = \sum[(^{Ni}/_{Ci})\varphi(i)/\sum\varphi(i) \quad (2)$$

де Ni – значення показника забрудненості;

і – номер показника забрудненості в ранговій послідовності зі m показників;

Сі – норматив (ГДК) показника;

φ(i) = i / 2i-1 – вагова функція;

Σφ(i) – приведена кількість показників.

Як основні приймаються такі показники забрудненості з відповідною ранговою послідовністю (i): $БСК_5$ (i = 1); NH_4^+(i = 2); нафтопродукти (i = 3); O_2 (i = 4). Ранги іншим показникам встановлюють експертне або за співвідношенням Ni/Сі. В залежності від значення коефіцієнта χ складено шкалу по оцінці ступеня забрудненості водного середовища (табл. 2).

Результати

Склад річкових вод формується під впливом різних природних та антропогенних факторів. Погіршення стану довкілля спричинене нераціональним використанням природних ресурсів, втручанням у ландшафт, застарілою інфраструктурою та виробничими технологіями. В результаті страждає здоров'я і тривалість життя місцевого населення, генофонд культурних і диких видів рослин і тварин.

Одним із важливих об'єктів екологічної і Смарагдової мереж на теренах України є басейн річки Згар, площею 1170 км^2, що належить до басейну річки Південний Буг, який займає площу 65 тис. км^2 і становить 11% площі країни. Річка Згар є правою притокою Південного Бугу. Її басейн розміщений у межах Деражнянської і Летичівської територіальних громад Хмельницької області та Літинської, Жмеринської і Калинівської територіальних громад Вінницької області. Довжина річки – 95 км, площа водозбірного басейну – 1170 км^2, глибина річки – 0,5–1,5 м, максимальна – до 5 м (але така глибина на сьогодні трапляється тільки у пригреблевих ділянках деяких ставків). У басейні річки Згар, за нашими дослідженнями, знаходиться більше 30 малих річок. На зрегульованих ділянках р. Згар та її притоках споруджено більше 50 ставків загальною площею водного дзеркала понад 2000 га. Нині воду з річки використовують для водопостачання, зрошування, ведення рибного господарства (Васенко та ін., 2017).

У роботі використані дані гідрохімічних спостережень басейну річки Згар Басейнового управління водних ресурсів

Таблиця 1

Критерії оцінки якості води за ІЗВ в басейні річки Згар

Клас якості води	**Характеристика класу**	**Значення ІЗВ**
I	Дуже чиста	≤ 0,30
II	Чиста	0,31 – 1,00
III	Помірно забруднена	1,01 – 2,50
IV	Забруднена	2,51 – 4,00
V	Брудна	4,01 – 6,00
VI	Дуже брудна	6,01 – 10,0
VII	Надзвичайно брудна	> 10,0

Таблиця 2

Інтегральна оцінка ступеня забрудненості водного середовища за коефіцієнтом χ

Коефіцієнт забрудненості вод x	**Якісна оцінка ступеня забрудненості**
До 1,00	Нешкідлива (чиста)
1 – 1,99	Мала
2 – 2,99	Припустима
3 – 3,99	Істотна
4 – 5,00	Інтенсивна
Більш 5,00	Катастрофічна

річки Південний Буг (БУВР) у пунктах спостережень (Мудрак та ін., 2022). Створи були розташовані на річці Згар, а саме: № 1 біля с. Згарок, № 2 біля с. Горбівці, № 3 – с. Микулинці, № 4 – с. Літин, № 5 – с. Новоселиця, № 6 – с. Мізяків (рис. 1).

Для визначення критеріїв якості води були використані гранично допустимі концентрації (ГДК) для поверхневих вод (Сніжко, 2001). Першим етапом дослідження був збір даних для досліджуваної території.

Потім було розраховано ІЗВ усіх відправок за період 2021–2023 років. На основі отриманих розрахунків було побудовано графік зміни ІЗВ для всіх точок спостереження (рис. 2).

У 2021 році ми спостерігаємо, що на створах спостережень № 2, № 3, № 4, № 5 (рис. 2), клас води відповідно до розрахованих ІЗВ однаковий та дорівнює у середньому № 1, № 6, № 2 – III "Помірно забруднена" (див. табл. 1).

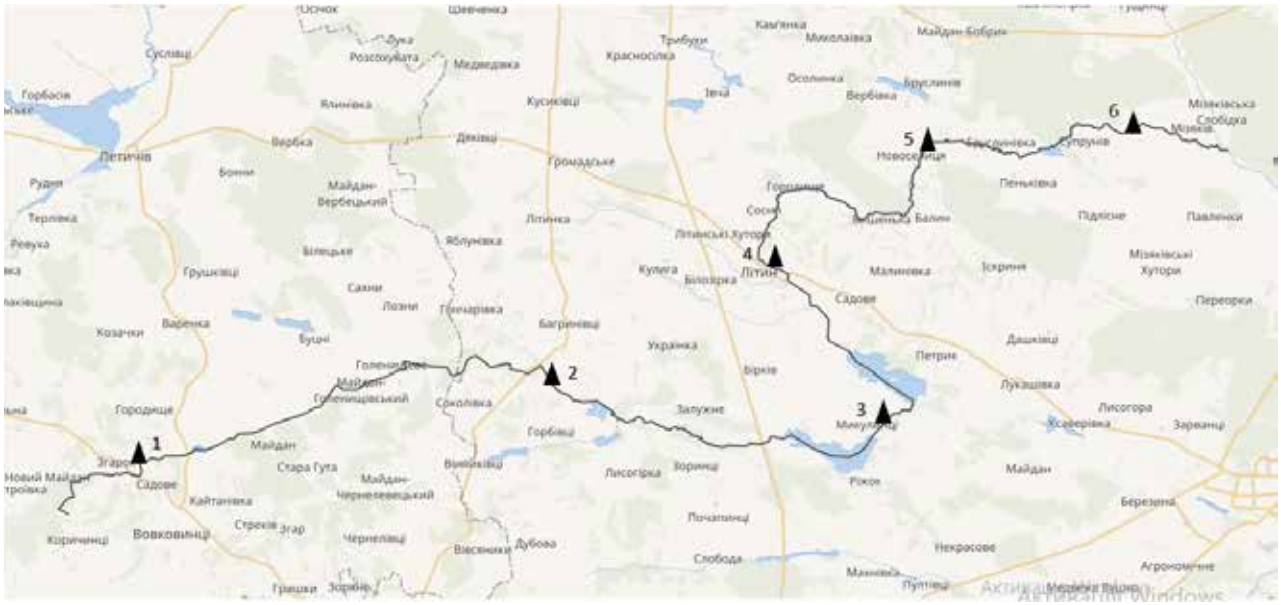


Рис. 1. Розміщення створів моніторингу на річці Згар

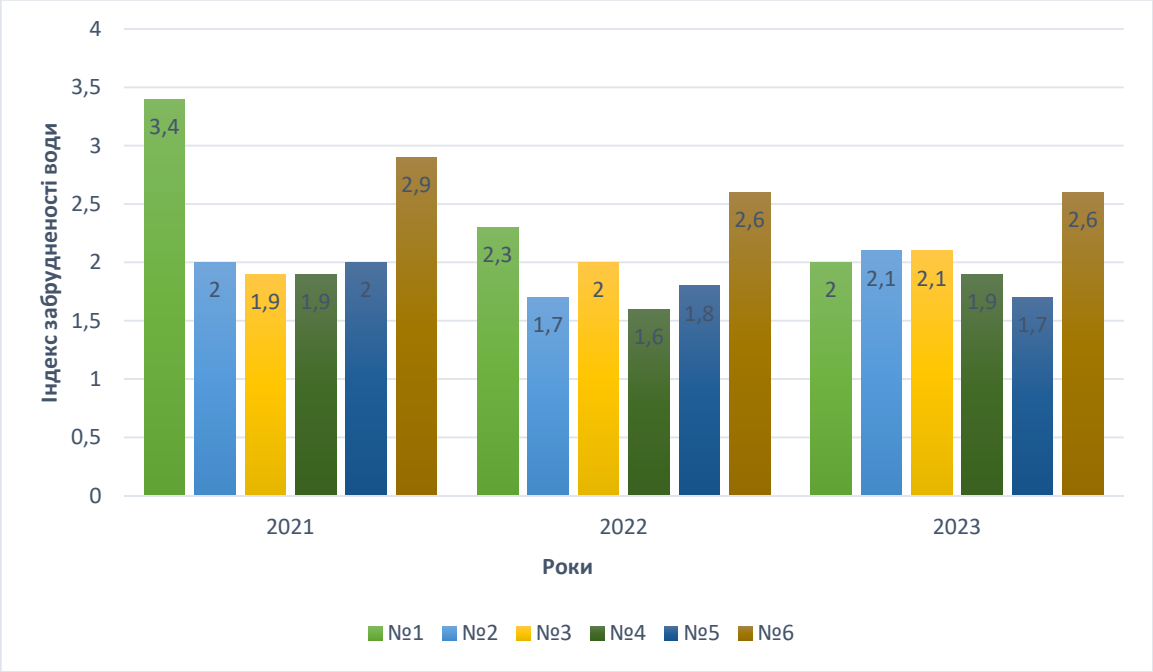


Рис. 2. Зміни індексу забрудненості води у басейні річки Згар

Якість води у цих річках можливо оцінити як "чисту". Якість води погіршується до IV класу "Забруднена". Індекс забрудненості води дорівнює у створах № 1 – 3,4, № 6 – 2,9. Зміни ІЗВ відбувається у більш широкому діапазоні з 0,9 на створі № 6 до 1,4 на створі № 1, але тенденції до збільшення або зменшення встановити неможливо.

У 2022 році ми спостерігаємо що на створах спостережень № 2, № 3, № 4, № 5 (див. рис. 2), клас води, відповідно до розрахованих ІЗВ, однаковий та дорівнює у середньому № 1, № 2 – II "Помірно забруднена" (див. табл. 1).

Якість води у цих річках можливо оцінити як "Помірно забруднена". Якість води погіршується до IV класу "Забруднена". Індекс забрудненості води дорівнює у створах № 1 – 2,3, № 6 – 2,6. Зміни ІЗВ відбувається діапазоні з 0,3 на створі № 6 до 0,3 на створі № 1, але тенденції до збільшення або зменшення встановити неможливо.

У 2023 році ми спостерігаємо, що на створах спостережень № 1, № 4, № 5 (див. рис. 2), клас води, відповідно до розрахованих ІЗВ, однаковий та дорівнює у середньому № 1, № 6 – II "Помірно забруднена" (див. табл. 1).

Якість води у річці Згар можливо оцінити як "Помірно забруднена". Якість води погіршується до IV класу "Забруднена". Індекс забрудненості води дорівнює у створах № 2 – 2,1, № 6 – 2,6. Зміни ІЗВ відбувається діапазоні з 0,1 на створі № 2 до 0,6 на створі № 6, але тенденції до збільшення або зменшення встановити неможливо (рис. 3).

Якість води басейну річки Згар (№ 2, № 3 створ) погіршується та дорівнює у середньому 2,1 – IV "забруднена", трендів у змінах ІЗВ не встановлено. Максимальне значення дорівнює створі № 1 – 3,4 у 2021 р. (див. рис. 1), це IV клас – "Забруднена" вода, таке високе значення викликано збільшенням концентрації азоту амонійного до 5,788 мг/дм^3, нітратів до 0,338 мг/дм^3 та нафтопродуктів 0,3 мг/дм^3. Мінімальне значення індексу забрудненості води рівняється 1,6 у 2022 р. для створу № 4.

Наступним кроком дослідження є обчислення коефіцієнту забрудненості води χ для всіх постів. При розрахунку нами були

Таблиця 3

Оцінка якості води за критерієм забрудненості χ

Пункти спостережень	**Коефіцієнт забруднення (χ)**	**Якісна оцінка ступеня забрудненості**
2021 рік		
№1 с. Згарок	3,11	Істотна
№2 с. Горбівці	2,4	Припустима
№3 с. Микулинці	1,53	Мала
№4 с. Літин	1,53	Мала
№5 с. Новоселиця	1,53	Мала
№6 с. Мізяків	2,8	Припустима
2022 рік		
№1 с. Згарок	2,8	Припустима
№2 с. Горбівці	2,0	Припустима
№3 с. Микулинці	2,1	Припустима
№4 с. Літин	1,8	Мала
№5 с. Новоселиця	1,8	Мала
№6 с. Мізяків	2,7	Припустима
2023 рік		
№1 с. Згарок	2,4	Припустима
№2 с. Горбівці	2,5	Припустима
№3 с. Микулинці	2,2	Припустима
№4 с. Літин	1,9	Мала
№5 с. Новоселиця	1,8	Мала
№6 с. Мізяків	2,7	Припустима

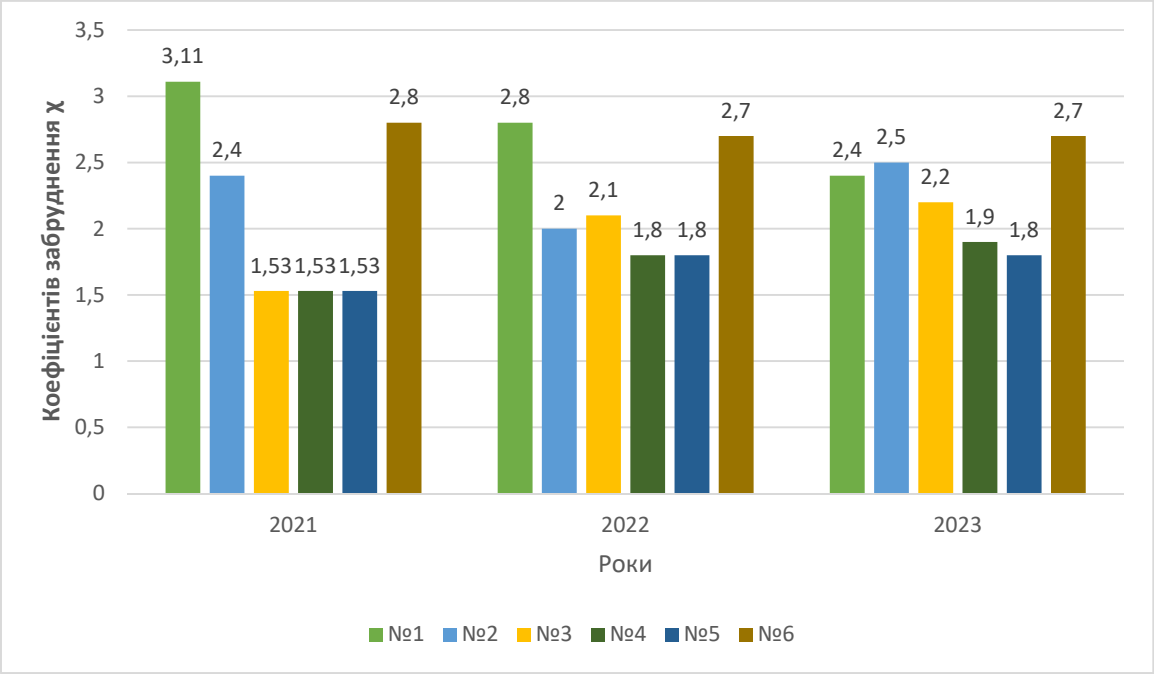


Рис. 3. Зміни коефіцієнтів забруднення х у басейні річки Згар

використані дані про середньоарифметичне значення концентрації 19-ти сполук.

До ІІ класу "мала" забруднення χ (див. табл. 2), за 2021 рік, відносяться створи № 3, № 4, № 5 (див. табл. 3). До ІІІ класу "припустима" створи № 2, № 6. Найбільш забруднена вода для створу 1, яка відноситься до І класу "істотна".

За 2022 р. найбільше забруднення ІІІ клас "припустима" було зафіксоване в створах № 1, № 2, № 3, № 6. У створах № 4, № 5 забруднення відноситься до ІІ класу "мала".

До ІІ класу "мала" забруднення χ (див. табл. 2) за 2023 рік відносяться створи № 1, № 2, № 3, № 6 (див. табл. 3). До ІІІ класу "припустима" створи № 4, № 5.

Обговорення

Однією з найважливіших ділянок екологічної та смарагдової мережі в Україні є басейн річки Згар, яка протікає в межах Деражнянської міської, Летичівської селищанської і Вовковинецької сільської територіальних громад Хмельницької області, а також Жмеринської міської, Калинівської міської і Літинського селищної територіальних громад Вінницької області з площею 1170 км^2. Басейн річки Згар є частиною басейну річки Південний Буг, який займає площу 65 000 км^2 або 11% від загальної площі України. Басейн річки Згар має велике значення для охорони навколишнього середовища, оскільки є осередком ендемізму і становить інтерес для охорони природи не тільки в Україні, але й у всій Європі як територія Смарагдової мережі. Басейн річки Згар розташований у правобережній лісостеповій зоні і тому відрізняється високим біорізноманіттям та ландшафтним різноманіттям. Завдяки сприятливому клімату, рельєфу, водним об'єктам та родючим ґрунтам, екологічне різноманіття регіону є дуже багатим і охороняється на 30 територіях та об'єктах природно-заповідного фонду. (Бірюков, 2014).

Висновки

Якість води за двома показниками – ІЗВ та трирічний коефіцієнт забрудненнях χ – свідчить про негативний антропогенний вплив на водозбірний басейн р. Згар. Це сприяло погіршенню екологічного стану р. Згар: аналіз ступеня забруднення води у часі за ІЗВ показує, що найвищі значення спостерігалися у 2021 році у першому створі і клас якості води р. Згар визначено як IV "забруднена". Зміни показників якості води відбуваються без часових закономірностей. Згідно з коефіцієнтом забруднення χ, якість води погіршується на всьому протязі річки. Село Горбівці, розташоване вздовж річки, є другою ділянкою, де якість води покращується завдяки самоочищенню річки.

Список використаної літератури

Бірюков О. В. Дослідження гідрографічної мережі річки Уди. *Наук. Вісник Чернівецького нац. ун-ту. Серія "Географія"*. 2014. № 3. С. 53–57.

Васенко О.Г., Лунгу М.Л., Ільєвська Ю.А., Клімов О. В. та ін. Комплексні експедиційні дослідження екологічного стану водних об'єктів басейну р. Уди (суббасейну р. Сіверський Донець). 2006. С. 156.

Васенко О.Г., Ієвлєва О.Ю., Коробкова Г.В., Жук В.М. Формування сучасного гідрохімічного стану басейну річки Сіверський Донець під впливом природних та антропогенних чинників. *Проблеми охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки.* 2017. № 39. С. 41–53.

Директива 2000/60/ЄС Європейського Парламенту і Ради «Про встановлення рамок діяльності Співтовариства у сфері водної політики». [Електронний ресурс] URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962 (дата звернення 05.07.2024).

Мудрак О.В., Клочанюк В.В. Екологічний стан басейну річки Згар. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції "Збалансоване природокористування: традиції, перспективи та інновації" (м. Київ, 3–4 листопада, 2022 р.). К. : ДІА, 2022. С. 148–150.

Мудрак О.В., Хаєцький Г.С., Мудрак Г.В., Серебряков В.В. Оцінка екологічного стану малих річок Східного Поділля в контексті сталого розвитку регіону. *Екологічні науки.* 2022. № 6 (45). С. 132–138. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.6-45.21.

Набиванець Б.І., Сухан В.В., Калабіна Л.В. Аналітична хімія природного середовища. Київ : Либідь. 1996. 304 с.

Сніжко С.І. Оцінка та прогнозування якості природних вод. К. : Ніка. Центр, 2001. 264 с.

Сайт Басейнового управління водних ресурсів річки Південний Буг. [Електронний ресурс] URL: https://buvrpb.davr.gov.ua (дата звернення 25.07.2024)

Сайт Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України [Електронний ресурс] URL: https://mepr.gov.ua (дата звернення 15.07.2024).

References

Biryukov, O.V. (2014). Doslidzhennia hidrohrafichnoi merezhi richky Udy. [Study of the hydrographic network of the Uda River]. *Nauk. Visnyk Chernivetskoho nats. un-tu. Seriia "Heohrafiia" [Scientific Bulletin of Chernivtsi National University. Series "Geography"],* 3, 53–57 [in Ukrainian].

Vasenko, O.G., Lungu, M.L., Ilievskaya, Y.A., & Klimov, O.V. (2006). Kompleksni ekspedytsiini doslidzhennia ekolohichnoho stanu vodnykh obiektiv baseinu r. Udy (subbaseinu r. Siverskyi Donets) [Comprehensive expeditionary studies of the ecological state of water bodies in the Uda River basin (Siverskyi Donets River sub-basin)]. Kharkiv : Ryder [in Ukrainian].

Vasenko, O.G., Ievleva, O.Yu., Korobkova, G.V., & Zhuk, V.M. (2017). Formuvannia suchasnoho hidrokhimichnoho stanu baseinu richky Siverskyi Donets pid vplyvom pryrodnykh ta antropohennykh chynnykiv [Formation of the current hydrochemical state of the Siverskyi Donets River basin under the influence of natural and anthropogenic factors]. *Problemy okhorony navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha ta ekolohichnoi bezpeky [Problems of environmental protection and ecological safety],* 39, 41–53 [in Ukrainian].

Dyrektyva 2000/60/YeS (2024). Dyrektyva 2000/60/IeS Yevropeiskoho Parlamentu i Rady «Pro vstanovlennia ramok diialnosti Spivtovarystva u sferi vodnoi polityky» [Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy] [Electronic resource] URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962 (access date 05.07.2024) [in Ukrainian].

Mudrak, O.V., & Klochaniuk, V.V. (2022) Ekolohichnyi stan baseinu richky Zghar [Ecological status of the Zgar River basin]. *Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Zbalansovane pryrodokorystuvannia: tradytsii, perspektyvy ta innovatsii" [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Sustainable Environmental Management: Traditions, Prospects and Innovations"].* Kyiv : DIA. p. 148–150 [in Ukrainian].

Mudrak, O.V., Hayetskyi, G.S., Mudrak, G.V., & Serebriakov, V.V. (2022). Otsinka ekolohichnoho stanu malykh richok Skhidnoho Podillia v konteksti staloho rozvytku rehionu [Assessment of the ecological status of small rivers of Eastern Podillia in the context of sustainable development of the region]. *Ekolohichni nauky [Ecological sciences],* 6 (45), 132–138. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.6-45.21 [in Ukrainian].

Nabyvanets, B.Y., Sukhan, V.V., & Kalabina, L.V. (1996). Analitychna khimiia pryrodnoho seredovyshcha [Analytical chemistry of the environment]. Kyiv : Lybid [in Ukrainian].

Snizhko, S.I. (2001). Otsinka ta prohnozuvannia yakosti pryrodnykh vod [Estimation and prediction of the quality of natural water]. Kyiv : Nika-Tsentr [in Ukrainian].

Sait Baseinovoho upravlinnia vodnykh resursiv richky Pivdennyi Buh (2024). [Website of the Southern Bug River Basin Water Resources Administration]. [Electronic resource] URL: https://buvrpb.davr.gov.ua (access date 25.07.2024) [in Ukrainian].

Sait Ministerstva zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy [Website of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine]. [Electronic resource] URL: https://mepr.gov.ua (access date 15.07.2024) [in Ukrainian].

Отримано: 28.10.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

УДК 543.42+628.16
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.23

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО ВМІСТУ КСЕНОБІОТИКІВ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ КИЇВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

К. А. Нестерова[1], Н. Ю. Терещенко[2]

Пестициди, як ксенобіотики, здатні проникати у водні екосистеми та накопичуватися в живих організмах, що викликає потребу у постійному моніторингу їхньої присутності в навколишньому середовищі. Оскільки ефективне виявлення таких речовин у воді є важливим для захисту довкілля та здоров'я населення, дослідження було проведено в Українській лабораторії якості і безпеки продукції АПК НУБіП України, акредитованій за стандартом ДСТУ ISO/IEC 17025.
У роботі досліджено оптимальні умови вилучення пестицидів з поверхневих вод та удосконалено їх кількісне визначення за допомогою хроматографії. Основна увага була приділена удосконаленню методики аналізу ліпофільних ксенобіотиків, що включає екстракцію за допомогою н-гексану та ацетонітрилу. Використання різних значень logP дозволяє ефективно екстрагувати ліпофільні сполуки. Для оцінки ефективності вилучення ксенобіотиків були застосовані речовини з різними logP. Це дозволило дослідити, як ліпофільність речовин впливає на їх вилучення з водного середовища та перерозподіл у органічний шар під час екстракції.
Для кількісного визначення пестицидів були використані хроматографічні методи ВЕРХ/МС/МС (високоефективна рідинна хроматографія) та ГХ/МС (газова хроматографія). Межа кількісного визначення становила 0,1 мкг/м³, з лінійним діапазоном концентрацій 0,100–1,000 мкг/м³. Запропонована методика підходить для моніторингових досліджень та дозволяє отримувати точні дані про залишкові кількості пестицидів у поверхневих водах, прогнозуючи можливе забруднення водойм. Постійний контроль за допомогою цієї методики забезпечує своєчасне виявлення ксенобіотиків та реагування на зміни у складі води, що запобігає негативним наслідкам для екосистем і здоров'я населення. Таким чином, використана методика є важливим інструментом для забезпечення екологічної безпеки сільськогосподарських водойм та зниження ризиків забруднення агрохімічними речовинами.

Ключові слова: *пестициди, вода, елементний склад, забруднення.*

[1] аспірант кафедри загальної, органічної та фізичної хімії
(Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ)
e-mail: nesterova.katarzyna@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4081-4570
[2] доцент кафедри медичної біохімії та молекулярної біології
(Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, м. Київ)
e-mail: n.tereshchenko@nmu.ua
ORCID: 0000-0003-0620-2888

DETERMINATION OF THE RESIDUAL CONTENT OF XENOBIOTICS WATER OBJECTS OF THE KYIV REGION

K. A. Nesterova, N. Yu. Tereshchenko

Pesticides, as xenobiotics, are able to penetrate into aquatic ecosystems and accumulate in living organisms, which causes the need for constant monitoring of their presence in the environment. Since the effective detection of such substances in water is important for the protection of the environment and the health of the population, the study was conducted at the Ukrainian Laboratory of Product Quality and Safety of the Agricultural Industry of the NUBiP of Ukraine, accredited according to the DSTU ISO/IEC 17025 standard. The work investigated the optimal conditions for the extraction of pesticides from surface waters and improved their quantitative determination using chromatography. The main attention was paid to the improvement of the method of analysis of lipophilic xenobiotics, which includes extraction with n-hexane and acetonitrile. The use of different values of logP allows efficient extraction of lipophilic compounds. Substances with different logP were used to evaluate the efficiency of extraction of xenobiotics. This made it possible to investigate how the lipophilicity of substances affects their extraction from the aqueous medium and redistribution into the organic layer during extraction.

HPLC/MS/MS (high-performance liquid chromatography) and GC/MS (gas chromatography) chromatographic methods were used for quantitative determination of pesticides. The limit of quantification was 0.1 μg/m³, with a linear concentration range of 0.100–1,000 μg/m³. The proposed method is suitable for monitoring studies and allows obtaining accurate data on the residual amounts of pesticides in surface waters, predicting possible contamination of water bodies. Continuous monitoring using this technique ensures timely detection of xenobiotics and response to changes in water composition, which prevents negative consequences for ecosystems and public health. Thus, the used technique is an important tool for ensuring the ecological safety of agricultural reservoirs and reducing the risks of contamination by agrochemical substances.

Key words: *pesticides, water, elemental composition, pollution.*

Вступ

Вода є одним із найважливіших природних ресурсів необхідним для підтримки життя. Проте антропогенні дії, зокрема розсіювання забруднювачів у навколишньому середовищі, значно погіршили якість цього ресурсу. Пестициди є одними з найнебезпечніших забруднювачів водних екосистем через їхню високу токсичність, стійкість у навколишньому середовищі та здатність до біонакопичення (Мосійчук і Хоружий, 2021; Timothy et al., 2021). Серед найпоширеніших груп пестицидів – хлорорганічні сполуки, фосфорорганічні сполуки, карбамати, піретроїди та неонікотиноїди (Sousa et al., 2021). Хлорорганічні сполуки відомі своєю високою токсичністю, високою розчинністю та стійкістю в навколишньому середовищі, а також асоціюються з канцерогенними та мутагенними ефектами (Kitte et al., 2023). Карбамати та органофосфати, у свою чергу, пов'язані з інгібуванням ферменту ацетилхолінестерази, а також мають вплив на безпліддя, тератогенну, цитотоксичну та генотоксичну дію.

До 1990 року в Україні відзначалося значне зростання використання агрохімікатів, включаючи пестициди та добрива. За цей період в агроландшафти України було внесено понад 1 млн тонн пестицидів, що еквівалентно 1360 тис. тонн по діючій речовині. Використання пестицидів на сільськогосподарських угіддях в 1990 році склало приблизно 104 тис. тонн, з них 24 тис. тонн інсектицидів, 26 тис. тонн фунгіцидів та 51 тис. тонн гербіцидів. Навантаження пестицидів на 1 га орної площі досягало 3 кг. Починаючи з 1990-х років, використання пестицидів в Україні поступово знижувалося. Це скорочення було частково компенсовано збільшенням токсичності діючих речовин пестицидів. Протягом 1960–2011 рр. на сільгоспугіддя України загалом було внесено понад 2 млн тонн пестицидів. Хоча пестициди широко використовуються для боротьби зі шкідниками, лише невеликий відсоток активного інгредієнта досягає сільськогосподарських культур, тоді як решта агрохімікатів розсіюється в навколишньому середовищі. Інтенсивне та постійне використання пестицидів у сільськогосподарському секторі призводить до значного підвищення їх концентрації у воді, що створює загрозу для здоров'я людини через харчовий ланцюг. Дослідження показали (Осокіна, 2022), що у підземних водах рівень хлорорганічних пестицидів складає в середньому до $1 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³, а у поверхневих водах річок та озер – до $1 \cdot 10^{-4}$ мг/дм³.

Газова хроматографія (GC) та високоефективна рідинна хроматографія (ВЕРХ) є стандартними методами для визначення слідових залишків ксенобіотиків. Проте, визначення ксенобіотиків у реальних пробах залишається складним завданням через складність матриці зразків і низькі рівні концентрації пестицидів. Ці фактори можуть суттєво ускладнювати точність і чутливість аналізу, вимагаючи ретельної підготовки зразків та оптимізації методів аналізу (Tong et al., 2019; O'Hara & Singh, 2021). Запропоновано прості аналітичні методології без використання розчинників, які є відносно швидкими та базуються на DI-SPME (прямій твердофазній мікроекстракції), GC-MS (газовій хроматографії з мас-спектрометрією) і GC-ECD (газовій хроматографії з електронозахоплювальним детектором). Ці методи були оптимізовані та прийняті для визначення залишків пестицидів у питній воді. Зокрема, методології дозволяють виявляти залишки пестицидів з дев'яти різних хімічних груп, серед яких фосфорорганічні сполуки, піретроїди, динітроаніліни, триазини, триазоли, тіокарбамати карбамати, хлорацетаніліди та хлорорганічних сполук. Підготовка зразків за допомогою цих методів включала використання безрозчинникових технологій, які забезпечили просту, надійну та ефективну альтернативу традиційним методам, що використовуються для визначення залишків пестицидів (Nascimento do Carmo et al., 2020). Серед сучасних методів мікроекстракції розглядаються такі техніки, як дисперсійна рідинно-рідинна мікроекстракція, рідинно-рідинна мікроекстракція на основі утворення/розкладання на місці, однокрапельна мікроекстракція, мікроекстракція в порожнистих волокнах у рідкій фазі та мікроекстракція в твердій фазі. Інноваційні підходи демонструють значний потенціал для покращення точності та чутливості аналітичних методів, а також для забезпечення більш екологічно безпечних процедур підготовки зразків (Hu et al., 2024).

Визначення залишків ксенобіотиків у складних матрицях є важким завданням через значні відмінності у властивостях пестицидів, таких як полярність, розчинність, значення pKa та летючість. Ці фактори ускладнюють аналіз, оскільки наявність матричних перешкод може суттєво вплинути на точність вимірювань, особливо коли ксенобіотики присутні у низьких концентраціях (Manousi et al., 2022). Отже, етап підготовки зразка, який включає збагачення та очищення, є критично важливим для усунення матричних перешкод перед проведенням детекції. Правильна техніка підготовки зразка також є необхідною для попереднього концентрування аналізованих речовин, що підвищує чутливість та точність подальшого аналізу. Цей етап є ключовим у аналітичній процедурі, оскільки забезпечує очищення зразків від матричних перешкод і підготовку їх до подальшого аналізу за допомогою аналітичних інструментів (Veni Veloo & Ibrahim, 2021).

За останні роки метод QuEChERS (швидкий, легкий, дешевий, ефективний, міцний і безпечний) здобув популярність у лабораторіях по всьому світу завдяки своїй універсальності та ефективності для екстракції органічних сполук з харчових матриць. Основою цього методу є екстракція аналіту за допомогою невеликого об'єму ацетонітрилу (ACN), після чого проводиться збір органічної фракції після етапу висолювання та її очищення за допомогою дисперсійної твердофазної екстракції (d-SPE). Метод QuEChERS дозволяє використовувати різні буферні солі на етапі висолювання в залежності від матриці та властивостей пестицидів. Для покращення етапу очищення зразків були розроблені модифіковані варіанти QuEChERS, що використовують такі сорбенти, як первинні вторинні аміни (PSA), графітована сажа (GCB) та октадецилсилан (C18). Для аналізу залишків малополярних, летких і напівлетких пестицидів у продуктах часто застосовується газова хроматографія в поєднанні з мас-спектрометрією (GC-MS). Для визначення напівполярних і полярних пестицидів використовується рідинна хроматографія з мас-спектрометрією (LC-MS), при цьому для точного визначення використовують потрійний квадрупольний мас-спектрометр у режимі обраної реакції (García-Vara et al., 2023).

Дослідження ксенобіотиків у зразках природної води ускладнюється наявністю завислих частинок, які можуть сорбувати ці аналіти. Підготовка проби до дослідження повинна включати два етапи: вилучення ксенобіотиків із дисперсного середовища (води) та десорбцію їх із дисперсної фази (завислих частинок). Такий підхід дозволяє адаптувати методику до конкретних умов та складу забруднень, що зустрічаються в зразках води, і забезпечити ефективне вилучення та аналіз ксенобіотиків. Для про-

гнозування ефективності екстракційного вилучення кожного ксенобіотику використовуються такі основні параметри:

1) дипольний момент молекули, який відображає розподіл заряду в молекулі, що впливає на її взаємодію з різними фазами;

2) константа розподілу (Kow): показує співвідношення концентрацій речовини між октанолом і водою, що дає уявлення про ліпофільність (схильність розчинятися в жирових середовищах);

3) логарифм коефіцієнту розподілу (logP): Логарифмічне значення константи розподілу, яке використовується для оцінки ліпофільності речовин.

З огляду на важливість питної води, вивчення впливу агрохімікатів на підземні води є надзвичайно актуальним питанням для України.

Мета роботи – дослідження умов вилучення залишкових кількостей активних інгредієнтів ксенобіотиків з поверхневої води та їх подальше вимірювання за допомогою хроматографічних методів.

Матеріал і методи

В роботі використовували аналітичні стандарти, з яких готували вихідні стандартні розчини кожної з досліджуваних сполук, проводили хроматографічний аналіз для удосконалення умов визначення діючих речовин системи захисту об'єктів сільського господарства. До досліджуваних сполук належали: гербіциди – біфенокс, ацетохлор, паракват, гліфосат, атразин; інсектициди – дельтаметрин, імідоклоприд, ДДТ; фунгіциди – пропамокарб, ципроконазол, оксадиксил. Для оптимізації умов підготовки проб створено модельні системи на основі деіонізованої води та лабораторних проб поверхневої води. Зразки води були відібрані відповідно до стандартів DSTU ISO 5667-4:2003 та DSTU ISO 5667-6:2009. Ці зразки містили завислі речовини. Модельні системи містили ліпофільні та гідрофільні ксенобіотики, додані шляхом розчинення аналітичних стандартів Sigma-Aldrich. Використані розчинники та реактиви, такі як ацетонітрил, ізопропанол, ацетон, деіонізована вода, н-гексан, натрію хлорид, натрію цитрат і магнію сульфат, які відповідали кваліфікації «для хроматографії» та «чда». Проведено вакуумну фільтрацію з використанням нейлонових мембранних фільтрів для виділення завислих речовин із проб води. Маса завислих речовин була визначена за допомогою аналітичних ваг першого класу точності. Масову концентрацію (*Сз*) обчислено за формулою $Сз = m/V$. Сухий залишок був екстрагований н-гексаном та ацетонітрилом, після чого зразки були концентровані в ротаційному випаровувачі до кратності 30:1. Вміст хімічних сполук у концентраті досліджувався методами високоефективної рідинної та газової хроматографії з мас-селективними детекторами на приладах HPLC UltiMate 3000-MSD 3200 Q TRAP та Agilent Technologies 7890-MSD 5975C. Експериментальні дані оброблялися за допомогою Microsoft Excel, похибка вимірювання розраховувалась через стандартне відхилення (Sr, %), а ступінь вилучення ксенобіотиків оцінювалась у відсотках (r, %).

Результати та обговорення

При лабораторному контролю необхідно оцінити можливість вилучення цільових аналітів зі зразків природної води, зокрема ліпофільних ксенобіотиків. Різні значення logP дозволяють дослідити ефективність екстрагування як сильно ліпофільних, так і менш ліпофільних сполук. Для встановлення ефективності вилучення цільових компонентів у дослідженні були використані суміші ксенобіотиків, які характеризуються різними величинами logP. Це дозволило оцінити, як ліпофільність речовин впливає на їхнє вилучення з водного середовища та перерозподіл в органічний шар під час екстракції (табл. 1).

Із табл. 1 можна зробити висновок, що ксенобіотики, які використовуються як гербіциди, такі як гліфосат і паракват, не можна ефективно екстрагувати октанолом через їхню ліпофобну (гідрофільну) природу. Це означає, що вони переважно залишаються у водному шарі і мають

Таблиця 1

Показники логарифму коефіцієнту розподілу молекул засобів хімізації сільського господарства

№	Засіб хімізації сільського господарства		(log*P*)
1	Дельтаметрин	Інсектецид	6.2
2	Імідоклоприд		1.2
3	ДДТ		6.9
4	Гліфосат	Гербицид	-3.1
5	Паракват		-4.5
6	Ацетохлор		4.1
7	Біфенокс		4.4
8	Атразин		2.6
9	Пропамокарб	Фунгіцид	0.8
10	Ципроконазол		3.1
11	Оксадиксил		1.4

низьку схильність до розчинення в органічних розчинниках, таких як октанол. З іншого боку, такі сполуки, як ацетохлор, біфенокс, ДДТ, дельтаметрин, оксадиксил і пропамокарб, є ліпофільними. Це означає, що вони мають високу схильність до розчинення в органічних розчинниках і можуть ефективно перерозподілятися в органічний шар при екстракції. Ліпофільність цих сполук забезпечує їх легке виділення з водного середовища шляхом екстракції в органічний шар, що дозволяє їх ефективно аналізувати методами хроматографії. Відповідно до їхніх фізико-хімічних властивостей, гідрофільні ксенобіотики не екстрагуються органічними розчинниками, що означає, що вони залишаються у водному шарі і не заважають процесу хроматографічного аналізу цільових ліпофільних речовин. Це спрощує процес підготовки проб, оскільки можна зосередитись на вилученні ліпофільних аналітів, які дійсно підлягають екстракції в органічний шар. Особливу увагу привертає різниця у значеннях параметру logP для різних ліпофільних аналітів. Значення logP відображає ліпофільність сполуки: чим вище значення logP, тим більша здатність сполуки розчинятися в органічному середовищі та, відповідно, ефективніше екстрагуватися з водного середовища. Ця різниця в logP вказує на те, що різні ліпофільні аналіти можуть вимагати специфічних умов для оптимального вилучення і хроматографічного аналізу, що слід враховувати при розробці методик лабораторного контролю.

Правильність методики визначення діючих речовин у модельних пробах води підтверджували методом «введено – визначено». Це дозволяє перевірити, наскільки ефективно методика відтворює реальний вміст аналітів у пробах та оцінити її надійність і точність. Результати хроматографічного аналізу штучно контамінованих зразків були порівняні з очікуваними концентраціями ксенобіотиків. На основі цього порівняння у таблиці 2 наведено кількісні параметри виконаних вимірювань.

Для визначення ефективності вилучення аналітів із водних зразків із високим вмістом завислих частинок (від 135,0 ± 20,0 до 1500,0 ± 100,0 мг/м³) була проведена екстракція аналітів із дисперсійного середовища (води) та дисперсної фази (завислих частинок). Отримані ацетонітрильні витяжки були об'єднані для подальшого хроматографічного контролю.

Для контролю чистоти методики та виявлення можливих матричних впливів було досліджено один холостий зразок поверхневої води без додавання ксенобіотиків. Це дозволило виявити нецільові коекстрактивні речовини, які могли б вплинути на результати аналізу. Три інші зразки води були досліджені після штучного додавання ксенобіотиків у кількості 0,1; 0,2; 0,4; 0,5; 0,6 та 1,0 мкг/м³.

Таблиця 2

Лабораторний контроль кількісного вмісту гідрофільних ксенобіотиків пестцидної дії у пробах води

Ксенобіотик		Внесено	Визначено
		мкг/м³	
Дельтаметрин	Інсектецид	0.10	0.10
		0.20	0.20
		0.30	0.29
		0.50	0.50
		0.60	0.61
		1.00	1.00
Імідоклоприд		0.10	0.12
		0.20	0.18
		0.30	0.31
		0.50	0.50
		0.60	0.60
		1.00	1.00
ДДТ		0.10	0.11
		0.20	0.20
		0.30	0.29
		0.50	0.50
		0.60	0.61
		1.00	1.00
Ацетохлор	Гербицид	0.10	0.10
		0.20	0.20
		0.30	0.28
		0.50	0.51
		0.60	0.62
		1.00	1.00
Біфенокс		0.10	0.11
		0.20	0.19
		0.30	0.27
		0.50	0.48
		0.60	0.57
		1.00	1.00
Атразин		0.10	0.12
		0.20	0.18
		0.30	0.29
		0.50	0.49
		0.60	0.59
		1.00	1.00

Продовження таблиці 2

Пропамокарб	Фунгіцид	0.10	0.11
		0.20	0.17
		0.30	0.26
		0.50	0.45
		0.60	0.61
		1.00	1.00
Ципроконазол		0.10	0.10
		0.20	0.20
		0.30	0.29
		0.50	0.50
		0.60	0.62
		1.00	1.00
Оксадиксил		0.10	0.11
		0.20	0.18
		0.30	0.32
		0.50	0.48
		0.60	0.58
		1.00	1.00

Порівняння введених та визначених кількостей ксенобіотиків у зразках показало, що в оптимальних умовах запропонованої методики можливі як втрати аналітів, так і їхнє збільшення. Зі збільшенням кількості введеного аналіту ступінь вилучення наближається до 100%, що свідчить про високу ефективність методики при більших концентраціях. Однак, для найменших концентрацій ксенобіотиків результати часто перевищують очікувані значення. Це може бути пов'язано з тим, що аналітичні сигнали на хроматограмі інтегруються разом із випадковими шумами, які мають найбільший вплив на сигнали від низьких концентрацій аналітів. Такий ефект може призводити до завищення результатів, особливо коли концентрація ксенобіотиків наближається до межі виявлення методу. Це підкреслює важливість ретельного контролю за точністю вимірювань при роботі з низькими концентраціями та можливість подальшої оптимізації методики для мінімізації таких впливів.

Висновки

Удосконалено умови визначення пестицидів системи захисту об'єктів сільського господарства в пробах води методом хроматографії, що дозволяє значно прискорити аналіз і зменшити витрати на його проведення. Це вдосконалення підвищує ефективність аналітичного контролю, забезпечуючи швидше отримання точних результатів при мінімальних витратах ресурсів.

Список використаної літератури

ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною. Київ : Міністерство охорони здоров'я України. 2010. 60 с.

ДСТУ 7369:2013. Національний стандарт України. Стічні води. Вимоги до стічних вод і їхніх осадів для зрошування та удобрювання. Київ : ДП «УкрНДНЦ». 2014.18 с.

Мосійчук Я., Хоружий П. Кількісні та якісні показники природних і стічних вод у басейні Дніпра. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки.* 2021. № 36. С. 39–47. https://doi.org/ 10.32347/2524-0021.2021.36.39-47.

Омельчук С.Т., Коршун О.М., Ліпавська А.О., Зінченко Т.І., Мілохов Д.С., Аврамчук А.О., Благая А.В. Аналітичний контроль у воді та повітрі залишкових кількостей пестицидів системи захисту хлібних злаків. *Медична та клінічна хімія.* 2022. № 24 (4). С. 86–94. https://doi.org/ 10.11603/mcch.2410-681X.2022.i4.13578.

Осокіна Н.П. Процеси міграції пестицидів і поводження з пестицидами в геологічному середовищі. *Мінеральні ресурси України.* 2022. № 2. С. 42–46.

García-Vara M., Postigo C., Palma P., Lopez de Alda M. Development of QuEChERS-based multiresidue analytical methods to determine pesticides in corn, grapes and alfalfa. *Food Chem.* 2023. Vol. 405(B). P. 134870. https://doi.org/ 10.1016/j.foodchem.2022.134870.

Hu C., Feng J., Cao Y., Chen L., Li Y. Deep eutectic solvents in sample preparation and determination methods of pesticides: Recent advances and future prospects. *Talanta.* 2024. Vol. 266(2). P. 125092. https://doi.org/10.1016/ j.talanta.2023.125092.

Kitte S.A., Chirfa G., Gure A. Effervescent powder-assisted floating organic solvent-based dispersive liquid-liquid microextraction for determination of organochlorine pesticides in water by GC–MS. *Heliyon.* 2023. Vol. 9. P. 12023–12954. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12954.

Manousi N., Kabir A., Zachariadis G.A. Recent advances in the extraction of triazine herbicidesfrom water samples. *JSSCCJ.* 2022. Vol. 45(1). P. 5(113–133). https://doi.org/10.1002/jssc.202100313.

Nascimento do Carmo S., Dorácio Mendes L., Corazza G., Comelli H., Merib J., Carasek E. Determination of pesticides of different chemical classes in drinking water

of the state of Santa Catarina (Brazil) using solid-phase microextraction coupled to chromatographic determinations. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2020. Vol. 27. P. 43870–43883. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10287-0.

O'Hara T., Singh B. Electrochemical Biosensors for Detection of Pesticides and Heavy Metal Toxicants in Water: Recent Trends and Progress. *ACS EST Water.* 2021. Vol. 1(3). P. 462–478. https://doi.org/10.1021/acsestwater.0c00125.

Sousa J., Oliveira do Nascimento H., de Oliveira Gomes H., Ferreira do Nascimento R. Review Article Pesticide residues in groundwater and surface water: recent advances in solid-phase extraction and solid-phase microextraction sample preparation methods for multiclass analysis by gas chromatography-mass spectrometry. *Microchem. J.* 2021. Vol. 168. P. 106359. https://doi.org/ 10.1016/j.microc.2021.106359.

Timothy O., Opeyemi A., Oyewo D. Onwudiw Simultaneous removal of organics and heavy metals from industrial wastewater: A review. *Chemosphere.* 2021. Vol. 262. P. 128379. https://doi.org/ 10.1016/ j.chemosphere.2020.128379.

Tong Y., Liu X., Zhang L. One-pot fabrication of magneticporous Fe_3/C/MnO/ graphitic carbon microspheres for disper-sive solid-phase extraction of herbicides prior to their quantifi-cation by HPLC. *Microchim Acta.* 2019. Vol. 186 (4). P. 256. https://doi.org/10.1007/s00604-019-3358-0.

Veni Veloo K., Ibrahim N.A.S. Analytical Extraction Methods and Sorbents' Development for Simultaneous Determination of Organophosphorus Pesticides' Residues in Food and Water Samples: A Review. *Mol.* 2021. Vol. 26. P. 5495. https://doi.org/10.3390/molecules26185495.

References

DSanPiN 2.2.4-171-10. (2010). Gigiyenichni vimogi do vodi pitnoyi, priznachenoyi dlya spozhivannya lyudinoyu [Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption]. Kyiv : Ministerstvo okhorony zdorov'ya Ukrayiny [in Ukrainian].

UkrNDNC. (2014). DSTU 7369:2013. Natsionalnyi standart Ukrainy. Stichni vody. Vymohy do stichnykh vod i yikhnikh osadiv dlya zroshuvannya ta udobryuvannya [DSTU 7369:2013 National Standard of Ukraine. Sewage. Requirements for wastewater and its sediments for irrigation and fertilization]. Kyiv : DP «UkrNDNC» [in Ukrainian].

Mosijchuk, Ya., & Horuzhij. P. (2021) Kilkisni ta yakisni pokazniki prirodnih i stichnih vod u basejni Dnipra [Quantitative and qualitative indicators of natural and wastewater in the Dnipro basin] *Problemi vodopostachannya, vodovidvedennya ta gidravliki [Problems of water supply, water drainage and hydraulics],* 36, 39–47. https://doi.org/10.32347/2524-0021.2021.36.39-47 [in Ukrainian].

Omelchuk, S.T., Korshun, O.M., Lipavska, A.O., Zinchenko, T.I., Milohov, D.S., Avramchuk, A.O., & Blagaya, A.V. (2022). Analitichnij kontrol u vodi ta povitri zalishkovih kilkostej pesticidiv sistemi zahistu hlibnih zlakiv [Analytical monitoring of residual amounts of pesticides in the water and air of the grain protection system]. *Medychna ta klinichna khimiia [Medical and clinical chemistry],* 24 (4), 86–94. https://doi.org/10.11603/mcch.2410-681X.2022.i4.13578 [in Ukrainian].

Osokina, N.P. (2022). Procesi migraciyi pesticidiv i povodzhennya z pesticidami v geologichnomu seredovishi [Pesticide migration processes and pesticide management in geological environments]. *Mineralni resursy Ukrainy [Mineral resources of Ukraine],* 2, 42–46 [in Ukrainian].

García-Vara, M., Postigo, C., Palma, P., & Lopez de Alda, M. (2023). Development of QuEChERS-based multiresidue analytical methods to determine pesticides in corn, grapes and alfalfa. *Food Chem*, 405 (B), 134870. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134870 [in English].

Hu, C., Feng, J., Cao, Y., Chen, L., & Li, Y. (2024). Deep eutectic solvents in sample preparation and determination methods of pesticides: Recent advances and future prospects. *Talanta*, 266 (2), 125092. https://doi.org/10.1016/ j.talanta.2023.125092 [in English].

Kitte, S.A., Chirfa, G., & Gure, A. (2023). Effervescent powder-assisted floating organic solvent-based dispersive liquid-liquid microextraction for determination of organochlorine pesticides in water by GC–MS. *Heliyon,* 9, 12023–12954. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12954 [in English].

Manousi, N., Kabir, A., & Zachariadis, G.A. (2022). Recent advances in the extraction of triazine herbicidesfrom water samples. *JSSCCJ*, 45 (1), 5 (113–133). https://doi.org/10.1002/ jssc.202100313 [in English].

Nascimento do Carmo, S., Dorácio Mendes, L., Corazza, G., Comelli, H., Merib, J., & Carasek, E. (2020). Determination of pesticides of different chemical classes in drinking water of the state of Santa Catarina (Brazil) using solid-phase microextraction coupled to chromatographic determinations. *Environ. Sci. Pollut. Res*, 27, 43870–43883. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10287-0 [in English].

O'Hara, T., & Singh, B. (2021). Electrochemical Biosensors for Detection of Pesticides and Heavy Metal Toxicants in Water: Recent Trends and Progress. *ACS EST Water,* 1 (3), 462–478. https://doi.org/10.1021/acsestwater.0c00125 [in English].

Sousa,, J., Oliveira do Nascimento, H., de Oliveira Gomes, H., & Ferreira do Nascimento, R. (2021). Review Article Pesticide residues in groundwater and surface water: recent advances in solid-phase extraction and solid-phase microextraction sample preparation methods for multiclass analysis by gas chromatography-mass spectrometry. *Microchem. J,* 168, 106359. https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106359 [in English].

Timothy, O., Opeyemi, A., & Oyewo, D. (2021). Simultaneous removal of organics and heavy metals from industrial wastewater: A review. *Chemosphere,* 262, 128379. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128379 [in English].

Tong, Y., Liu, X., & Zhang, L. (2019). One-pot fabrication of magneticporous Fe_3/C/MnO/graphitic carbon microspheres for disper-sive solid-phase extraction of herbicides prior to their quantifi-cation by HPLC. *Microchim Acta*, 186 (4), 256. https://doi.org/10.1007/s00604-019-3358-0 [in English].

Veni Veloo, K., & Ibrahim, N.A.S. (2021). Analytical Extraction Methods and Sorbents' Development for Simultaneous Determination of Organophosphorus Pesticides' Residues in Food and Water Samples: A Review. *Mol,* 26, 5495. https://doi.org/10.3390/molecules26185495 [in English].

Отримано: 11.10.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

УДК 72.01:692.4:699.86:574.1:502.36
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.24

ВИКОРИСТАННЯ СІРОЇ ВОДИ ЗЕЛЕНИМИ ДАХАМИ: СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ

Л. Д. Романчук[1], Л. О. Герасимчук[2], Р. А. Валерко[3]

В умовах глобальних кліматичних змін та зростаючого дефіциту водних ресурсів особливої актуальності набуває питання ефективного використання води в міському середовищі. Дана стаття представляє комплексне дослідження використання сірої води для зрошення зелених дахів як інноваційного підходу до сталого водокористування в будівництві.
У роботі проаналізовано фізико-хімічні та біологічні характеристики сірої води з різних джерел (ванних кімнат, пральних машин, кухонь) та їх відповідність вимогам для поливу рослинності. Досліджено сучасні технології очищення та підготовки сірої води, включаючи механічну фільтрацію, біологічне очищення та УФ-дезінфекцію. Особлива увага приділяється впливу очищеної сірої води на ріст та розвиток різних видів рослин, що використовуються в озелененні дахів.
На основі експериментальних даних та практичного досвіду впровадження подібних систем проведено техніко-економічний аналіз, який демонструє потенціал економії 60–80% питної води при використанні сірої води для зрошення зелених дахів. Розглянуто екологічні переваги такого підходу, включаючи зменшення навантаження на міські системи водопостачання та водовідведення, скорочення енергоспоживання та зниження вуглецевого сліду будівель.
У статті також представлено аналіз нормативно-правової бази щодо використання сірої води в різних країнах та надано практичні рекомендації з проєктування, монтажу та експлуатації систем повторного використання води для зелених дахів. Результати дослідження можуть бути корисними для архітекторів, інженерів, екологів та спеціалістів у галузі сталого будівництва.
У статті представлено результати 12-місячного експериментального дослідження з використання очищеної сірої води для поливу зелених дахів. Метою дослідження було визначення ефек-

[1] доктор сільськогосподарський наук,
професор кафедри екології та природоохоронних технологій
(Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир)
e-mail: Ludmilaromanchuck14@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4790-8414
[2] 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
[3] 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

тивності та безпечності застосування сірої води як альтернативного джерела іригації для зелених дахових систем. Експеримент проводився на чотирьох модульних установках, де порівнювались показники росту рослин та стану субстрату при використанні очищеної сірої води та водопровідної води.
Таким чином, практична значущість зелених дахів із системами використання сірої води є всебічною та має довгостроковий позитивний вплив на розвиток сталого міського середовища. Їх впровадження сприяє формуванню більш комфортних, екологічних та енергоефективних міст.

Ключові слова: *сталий розвиток, озеленення дахів, енергоефективність, екологічні переваги, сіра вода, міське озеленення.*

GRAY WATER UTILIZATION BY GREEN ROOFS: SYSTEM ANALYSIS AND IMPLEMENTATION PROSPECTS

L. D. Romanchuk, L. O. Gerasymchuk, R. A. Valerko

In the conditions of global climate changes and the growing shortage of water resources, the issue of efficient use of water in the urban environment is gaining particular relevance. This article presents a comprehensive study of the use of gray water for irrigation of green roofs as an innovative approach to sustainable water use in construction.
The work analyzed the physico-chemical and biological characteristics of gray water from various sources (bathrooms, washing machines, kitchens) and their compliance with the requirements for watering vegetation. Modern technologies for the purification and preparation of gray water, including mechanical filtration, biological purification and UV disinfection, were studied. Special attention is paid to the effect of purified gray water on the growth and development of various types of plants used in roof landscaping.
On the basis of experimental data and practical experience of implementing similar systems, a technical and economic analysis was carried out, which demonstrates the potential of saving 60–80% of drinking water when using gray water for irrigation of green roofs. The environmental benefits of such an approach are considered, including reducing the burden on urban water supply and drainage systems, reducing energy consumption and reducing the carbon footprint of buildings.
The article also presents an analysis of the legal framework for the use of gray water in different countries and provides practical recommendations for the design, installation and operation of water reuse systems for green roofs. The results of the study can be useful for architects, engineers, ecologists and specialists in the field of sustainable construction.
The article presents the results of a 12-month experimental study on the use of purified gray water for watering green roofs. The purpose of the study was to determine the effectiveness and safety of using gray water as an alternative source of irrigation for green roof systems. The experiment was carried out on four modular installations, where indicators of plant growth and the state of the substrate were compared when using purified gray water and tap water.
Thus, the practical significance of green roofs with gray water utilization systems is comprehensive and has a long-term positive impact on the development of a sustainable urban environment. Their implementation contributes to the formation of more comfortable, ecological and energy-efficient cities.

Key words: *sustainable development, green roofs, energy efficiency, environmental benefits, gray water, urban landscaping.*

Вступ

Стрімка урбанізація та кліматичні зміни створюють безпрецедентні виклики для сучасних міст. За даними ООН, до 2050 року понад 68% світового населення проживатиме в міських районах, що суттєво збільшить навантаження на міську інфраструктуру та природні ресурси. В умовах зростаючого дефіциту води та посилення ефекту міських теплових островів, впровадження зелених технологій стає не просто екологічною ініціативою, а необхідною стратегією для забезпечення сталого розвитку міст (Грасимчук та ін, 2024). У цьому контексті особливого значення набуває розвиток технологій повторного використання води, зокрема сірої води, яка становить 50–80% господарсько-побутових стоків (Noutsopoulos et al., 2017).

Зелені дахи, як один із ключових елементів зеленої інфраструктури, довели свою ефективність у пом'якшенні негативних наслідків урбанізації. Вони сприяють зменшенню поверхневого стоку, покращенню якості повітря, зниженню температури міського середовища та підвищенню енер-

гоефективності будівель. За даними World Green Infrastructure Network (2023), площа зелених дахів у світі щорічно зростає на 15–20%, що свідчить про їх зростаючу популярність та визнання їхніх переваг.

Однак, разом із поширенням зелених дахів виникають нові виклики, зокрема, пов'язані з їх водозабезпеченням. Традиційне використання питної води для іригації зелених дахів створює додаткове навантаження на міські водні ресурси, що особливо критично в регіонах із обмеженим водопостачанням. За оцінками експертів (Рибак та ін., 2023), середній зелений дах площею 100 м² може споживати від 1000 до 2000 літрів води на місяць у період активної вегетації.

У контексті цих викликів, використання альтернативних джерел води, зокрема очищеної сірої води, набуває особливої актуальності. Сіра вода, яка утворюється від побутового використання (душ, раковини, пральні машини), при належній очистці ця вода може стати цінним ресурсом для іригації зелених насаджень (Рибак та ін., 2024).

Попередні дослідження демонструють значний потенціал використання сірої води в міському озелененні, що впровадження систем повторного використання сірої води може зменшити споживання питної води на 30–40% у міських умовах (Azabache et al., 2020). Однак, специфіка застосування сірої води саме для зелених дахів залишається недостатньо вивченою. Існують певні застереження щодо довгострокового впливу сірої води на рослини та конструктивні елементи зелених дахів, якості очистки води та економічної доцільності таких систем.

Особливої уваги потребують питання:

- Оптимізації систем очистки сірої води для забезпечення належної якості.
- Впливу специфічного хімічного складу сірої води на ріст та розвиток рослин.
- Змін фізико-хімічних властивостей субстрату при тривалому використанні сірої води.
- Економічної ефективності впровадження систем повторного використання води.
- Нормативно-правового регулювання використання сірої води для іригації.

Юнус та ін. (2020) підкреслюють необхідність комплексного підходу до оцінки ефективності використання сірої води, що враховує не лише технічні аспекти, але й економічні, екологічні та соціальні фактори. Рибак та ін. (2024) наголошують на важливості вивчення довгострокових ефектів використання сірої води на біорізноманіття та екосистемні послуги зелених дахів.

Дослідження використання сірої води для зрошення зелених дахів активно розвивається протягом останнього десятиліття. Аналіз публікаційної активності демонструє зростаючий інтерес до цієї теми (табл. 1).

Результати цього дослідження можуть стати основою для розробки практичних рекомендацій щодо впровадження систем повторного використання сірої води в зелених дахах, що сприятиме підвищенню стійкості міської інфраструктури та ефективному використанню водних ресурсів.

Матеріал і методи

Метою дослідження було визначення ефективності та безпечності використання очищеної сірої води для іригації зелених дахів.

Основні завдання:

1. Оцінка якості очищеної сірої води та її відповідності нормативам.
2. Порівняльний аналіз росту рослин при використанні різних типів води.
3. Дослідження впливу сірої води на фізико-хімічні властивості субстрату.
4. Економічний аналіз впровадження системи повторного використання води.

Дослідження проводилось на 4х модульних зелених дахах площею 2 м² кожен (рис. 1). Модулі були обладнані: системою гідроізоляції, дренажним шаром, субстратом глибиною 15 см, системою автоматичного поливу, датчиками моніторингу. Два модулі використовувались як контрольні (полив водопровідною водою), два інші – як експериментальні (полив очищеною сірою водою).

Для експерименту була розроблена багатоступенева система очистки, що включала:

Таблиця 1

Аналіз публікацій

Період	**Кількість публікацій**	**Основні напрямки досліджень**
2015–2017	156	Якість сірої води, методи очищення
2018–2020	284	Вплив на рослинність, економічна ефективність
2021–2023	412	Автоматизація систем, інтеграція з розумними будівлями
2024	89	Інноваційні технології, нормативне регулювання

Рис. 1. Експериментальна установка

механічну фільтрацію (20 мкм), біологічну очистку з використанням аеробних бактерій, UV-стерилізацію, систему контролю якості води в реальному часі.

Для експерименту були відібрані типові види рослин для зелених дахів: Sedum album, Sedum spurium, Festuca glauca, Delosperma cooperi.

Протягом 12 місяців проводились регулярні вимірювання наступних параметрів:

Якість води (pH, електропровідність, вміст органічних речовин).

Стан рослин (ріст, біомаса, здоров'я).

Характеристики субстрату (вологість, pH, сольовий склад).

Мікробіологічні показники.

Результати та обговорення

Характеристика сірої води

Сіра вода (англ. *greywater*) – це побутові стічні води, які утворюються в результаті господарської діяльності людини, яка не містить фекалій. Основні властивості (табл. 2): температура: 18–35°C; колір: від прозорого до світло-сірого; запах: слабкий специфічний; вміст органічних речовин: помірний; наявність поживних речовин: незначний.

Основні джерела сірої води в будівлях можна розділити на три категорії за рівнем забруднення:

• Слабкозабруднені джерела: ванни та душові кабіни, які генерують найбільший об'єм сірої води (35–40% від загального об'єму). Ця вода містить відносно низький рівень забруднень, переважно залишки мила, шампуню та інших засобів особистої гігієни. Умивальники, які продукують близько 5–8% загального об'єму сірої води. Забруднення включають залишки зубної пасти, мила та косметичних засобів.

• Середньозабруднені джерела: пральні машини, які генерують 15–20% загального об'єму сірої води. Ця вода містить синтетичні миючі засоби, мікроволокна від одягу та інші забруднювачі. Конденсат від систем кондиціонування, який становить незначну частку (2–3%), але є достатньо чистим джерелом води.

• Сильнозабруднені джерела: кухонні мийки, що продукують 10–12% загального об'єму. Ця вода містить значну кількість органічних забруднень, жирів та харчових залишків. Посудомийні машини (5–7% об'єму), вода з яких містить залишки миючих засобів та харчових відходів.

Таблиця 2

Склад та властивості сірої води

Параметр	**Значення**	**Допустимі межі для поливу**
pH	6.5–8.5	6.0–9.0
БСК5 (мг/л)	90–290	<200
Завислі речовини (мг/л)	45–330	<100
Загальний азот (мг/л)	2.1–31.5	<40
Загальний фосфор (мг/л)	0.6–27.3	<30

Джерело: (Chougule et al., 2023)

Системи очищення та підготовки сірої води

Очищення сірої води включає такі основні етапи (табл. 3):

1. Попередня фільтрація – видалення великих частинок бруду, волосся та інших механічних домішок через сітчастий фільтр.
2. Відстоювання – осадження дрібних частинок у відстійнику.
3. Біологічне очищення – розкладання органічних речовин за допомогою корисних бактерій. Часто використовуються біофільтри з природними наповнювачами.
4. Фінальна фільтрація – очищення через пісок, активоване вугілля або інші фільтруючі матеріали.
5. Дезінфекція (опціонально) – знезараження води УФ-променями або іншими методами, якщо вода буде використовуватись для поливу їстівних рослин.

Таблиця 3

Технологічні показники очищення

Метод очищення	**Ефективність видалення (%)**	**Енергоспоживання (кВт*год/м³)**	**Вартість ($/м³)**
Механічна фільтрація	60–70	0.1–0.2	0.05–0.10
Біологічне очищення	85–95	0.3–0.5	0.15–0.25
Мембранна фільтрація	95–99	0.5–0.8	0.30–0.50

Джерело: (Prajapati et al., 2019)

Після цього її можна використовувати для поливу рослин на зелених дахах.

Результати нашого дослідження показали, що після очистки сіра вода відповідала всім необхідним параметрам для іригації рослин. Середні показники pH становили 7.2±0.3, що знаходиться в оптимальному діапазоні для більшості рослин. Показники якості очищеної сірої води відповідають встановленим нормативам для іригації (Hajlaoui et al., 2022). Електропровідність (780±70 µS/cm) також не перевищує критичних значень, що узгоджується з рекомендаціями (McCann et al., 2019), щодо використання альтернативних джерел води для міського озеленення.

Вплив на рослинність зелених дахів

Порівняльний аналіз росту рослин показав відсутність статистично значущої різниці між контрольними та експериментальними модулями. В деяких випадках спостерігався навіть кращий розвиток рослин у модулях з використанням сірої води, що може бути пов'язано з додатковим надходженням поживних речовин.

Спостерігалась позитивна динаміка росту в обох групах, з дещо кращими показниками у групі з використанням сірої води (рис. 2):

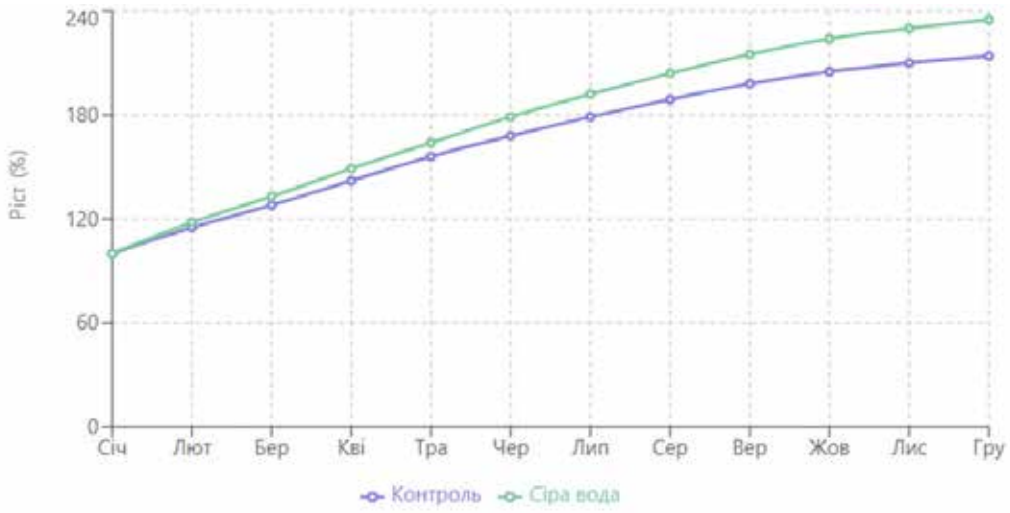


Рис. 2. Динаміка росту рослин протягом року

- Середній приріст біомаси: +8%.
- Площа листової поверхні: +12%.
- Інтенсивність цвітіння: +15%.
- Виживаність рослин: 95% vs 93%.

Щоб сіра вода не нашкодила рослинам на даху, обов'язково потрібно надавати перевагу солестійким видам, використовувати рослини, стійкі до лужного середовища та обирати посухостійкі види (табл. 4).

Стан субстрату

Моніторинг стану субстрату не виявив негативних змін при використанні очищеної сірої води. Спостерігалось незначне збільшення вмісту органічних речовин, що може мати позитивний вплив на розвиток рослин.

Економічна ефективність

Використання сірої води для зрошення зелених дахів стає все більш популярним

Таблиця 4

Адаптація рослин

Вид рослин	**Адаптація до сірої води**	**Рекомендації по поливу**
Седуми	Висока	1–2 рази на тиждень
Трави	Середня	2–3 рази на тиждень
Сукуленти	Висока	1 раз на тиждень
Почво-покривні	Середня-висока	2–3 рази на тиждень

рішенням з огляду на економічну ефективність. Основна перевага полягає у значному скороченні витрат на водопостачання – в середньому на 40–50% зменшується споживання питної води. Також знижуються витрати на водовідведення, оскільки вода повторно використовується в системі.

Економічний аналіз продемонстрував:

- Початкові інвестиції: 1200 євро/м².
- Термін окупності: 4,5 роки.
- Економія води: 40–50%.
- Зниження експлуатаційних витрат: 35%.

Додатковим економічним бенефітом є економія на добривах, оскільки сіра вода містить поживні речовини. Зелений дах з системою повторного використання води підвищує енергоефективність будівлі, збільшує вартість нерухомості та покращує її екологічний імідж. Це особливо актуально для комерційних об'єктів, які прагнуть відповідати стандартам зеленого будівництва.

Таким чином, незважаючи на початкові витрати, використання сірої води для зелених дахів є економічно доцільним рішенням з довгостроковою перспективою.

Використання сірої води для зрошення зелених дахів має значні екологічні переваги (рис. 3). За даними (Amin et al., 2023), такий підхід може зменшити споживання питної води на 30–40% у міських умовах. Наші результати демонструють додаткову перевагу у вигляді підвищеного вмісту органічних речовин у субстраті (6.8±0.6%), що сприяє кращому розвитку рослин.

Використання сірої води для зрошення зелених дахів створює значні екологічні переваги, які позитивно впливають на міське середовище та сталий розвиток. На рівні будівлі система забезпечує суттєву економію питної води, зменшуючи її споживання на 40–60%. Зелений дах ефективно регулює мікроклімат, знижуючи температуру повітря влітку на 3–7°C та підвищуючи вологість на 10–15%.

Важливим аспектом є покращення якості повітря – рослинний покрив здатний поглинати до 85% пилу та інших забруднюючих речовин, одночасно виробляючи кисень та поглинаючи CO2. Система також ефективно управляє дощовими водами, затримуючи 60–80% опадів, що значно знижує навантаження на міську каналізацію (рис. 4).

Важливо відзначити, що зелені дахи з системою повторного використання сірої води створюють нові екосистеми в міському середовищі, підтримуючи біорізноманіття та забезпечуючи середовище існування для різних видів. Вони також відіграють

Рис. 3. Екологічні переваги зелених дахів

Рис. 4. Проєктування системи сірої води для зелених дахів

важливу роль у зниженні ефекту «міського теплового острова» та адаптації міст до кліматичних змін (Валерко та ін., 2024).

Стан субстрату

Моніторинг стану субстрату не виявив негативних змін при використанні очищеної сірої води. Спостерігалось незначне збільшення вмісту органічних речовин, що може мати позитивний вплив на розвиток рослин.

Економічна ефективність

Використання сірої води для зрошення зелених дахів стає все більш популярним рішенням з огляду на економічну ефективність. Основна перевага полягає у значному скороченні витрат на водопостачання – в середньому на 40–50% зменшується споживання питної води. Також знижуються витрати на водовідведення, оскільки вода повторно використовується в системі.

- Економічний аналіз продемонстрував:
- Початкові інвестиції: 1200 євро/м².
- Термін окупності: 4,5 роки.
- Економія води: 40–50%.

Зниження експлуатаційних витрат: 35%.

Додатковим економічним бенефітом є економія на добривах, оскільки сіра вода містить поживні речовини. Зелений дах з системою повторного використання води підвищує енергоефективність будівлі, збільшує вартість нерухомості та покращує її екологічний імідж. Це особливо актуально для комерційних об'єктів, які прагнуть відповідати стандартам зеленого будівництва.

Таким чином, незважаючи на початкові витрати, використання сірої води для зелених дахів є економічно доцільним рішенням з довгостроковою перспективою.

Використання сірої води для зрошення зелених дахів має значні екологічні переваги (див. рис. 4). За даними (Amin et al., 2023), такий підхід може зменшити споживання питної води на 30–40% у міських умовах. Наші результати демонструють додаткову перевагу у вигляді підвищеного вмісту органічних речовин у субстраті (6.8±0.6%), що сприяє кращому розвитку рослин.

Використання сірої води для зрошення зелених дахів створює значні екологічні переваги, які позитивно впливають на міське середовище та сталий розвиток. На рівні будівлі система забезпечує суттєву економію питної води, зменшуючи її споживання на 40–60%. Зелений дах ефективно регулює мікроклімат, знижуючи температуру повітря влітку на 3–7°C та підвищуючи вологість на 10–15%.

Важливим аспектом є покращення якості повітря – рослинний покрив здатний поглинати до 85% пилу та інших забруднюючих речовин, одночасно виробляючи кисень та поглинаючи CO_2. Система також ефективно управляє дощовими водами, затримуючи 60–80% опадів, що значно знижує навантаження на міську каналізацію (див. рис. 3).

Важливо відзначити, що зелені дахи з системою повторного використання сірої води створюють нові екосистеми в міському середовищі, підтримуючи біорізноманіття та забезпечуючи середовище існування для різних видів. Вони також відіграють важливу роль у зниженні ефекту «міського теплового острова» та адаптації міст до кліматичних змін (Валерко та ін., 2024).

Таблиця 5

Порівняльна характеристика показників експерименту

Параметр	Контроль	Сіра вода	Норма
pH води	7.0±0.2	7.2±0.3	6.5–8.0
Електропровідність (µS/cm)	550±50	780±70	<1500
Висота рослин (см)	25±3	28±3	20-30
Біомаса (г/м²)	450±40	485±45	>400
Вологість субстрату (%)	35±5	38±5	30–40
Вміст органіки (%)	5.2±0.5	6.8±0.6	5–8

Висновки

Проведене дослідження використання сірої води зеленими дахами демонструє комплексний вплив цієї технології на міське середовище та її значний потенціал для сталого розвитку міст (табл. 5).

Економічний аналіз показує суттєву ефективність впровадження таких систем. Досягається зменшення споживання питної води на 40–60%, що разом із скороченням експлуатаційних витрат на 20–30%, забезпечує окупність початкових інвестицій протягом 3–5 років. Додатковою перевагою є підвищення енергоефективності будівлі та зростання її ринкової вартості. Це підтверджує висновки (Woltersdorf et al., 2018) щодо економічної доцільності впровадження систем повторного використання води в міській інфраструктурі.

Екологічний аспект характеризується значним позитивним впливом на міське середовище. Системи забезпечують ефективну фільтрацію повітря, затримуючи до 85% забруднень, створюють нові екосистеми та підтримують біорізноманіття. Важливим є внесок у зменшення ефекту міського теплового острова та управління дощовими водами (Рибак та ін., 2024).

Технічна реалізація проєктів вимагає комплексного підходу до проєктування та впровадження автоматизованих систем контролю. Критичними факторами є забезпечення якості води, надійність систем очистки та регулярне технічне обслуговування. При дотриманні всіх вимог системи демонструють стабільну та ефективну роботу.

Нормативне регулювання галузі потребує подальшого розвитку. Хоча існують міжнародні стандарти та рекомендації, необхідна розробка специфічних національних норм та процедур сертифікації. Особливу увагу слід приділити санітарно-гігієнічному контролю та регламентації експлуатаційних процесів.

Перспективи впровадження технології оцінюються як високі, враховуючи зростаючий попит на екологічні рішення та необхідність адаптації міст до кліматичних змін. Розвиток технічних рішень та обладнання створює передумови для масштабування технології.

Основні обмеження пов'язані з початковими інвестиційними витратами, необхідністю регулярного обслуговування та потребою у кваліфікованому персоналі. Проте ці виклики компенсуються довгостроковими перевагами та позитивним впливом на міське середовище.

Соціальний вплив реалізації таких проєктів включає покращення якості життя, створення нових робочих місць та розвиток екологічної свідомості. Формування сталих міських спільнот та підвищення обізнаності щодо екологічних технологій є важливими супутніми ефектами.

Таким чином, впровадження систем використання сірої води зеленими дахами є перспективним напрямком розвитку міської інфраструктури, що забезпечує збалансоване поєднання економічних, екологічних та соціальних переваг. Подальший розвиток технологій та вдосконалення нормативної бази сприятиме ширшому впровадженню цих систем у містах.

Список використаної літератури

Валерко Р.А., Герасимчук Л.О., Бельмега І.В., Шацило Є.Г. Зелені дахи як напрям наукових досліджень. Державний університет «Житомирська політехніка». Житомир, 2024. [Електронний ресурс] URL: http://agrarian-innovations.izpr.ks.ua/index.php/agrarian/article/view/552 (дата звернення 24.11.2024).

Герасимчук П.О., Валерко Р.А., Весельський О.О. Переваги зелених дахів та їх розрахунок. *Аграрні інновації.* 2024. № 23. С. 48–57. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.23.7.

Рибак О.С. «Зелений дах-біорізноманіття»: технології будівництва, утримання, обслуговування та особливості контролю біотичної складової. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського.* 2023. № 5. С. 35–41. https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.5.4.

Рибак О.С., Пацева І.Г. Екологічні основи аналізу впливу «зелених» дахів на міський клімат в урбоценозах. *Вісник хмельницького національного університету.* 2023. № 5 (2). С. 103–107. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-325-5-103-107.

Рибак О.С., Пацева І.Г. Зелені дахи як елемент децентралізованого управління дощовою водою. *Проблеми хімії та сталого розвитку.* 2023. № 2. С. 40–46. https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-2-6.

Рибак О.С., Пацева І.Г. Міське огородництво на даху – екологічне подолання продовольчої кризи в урбанізованому середовищі. *Аграрні інновації.* 2024. № 24. С. 135–140. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.24.19.

Amin M., Dorra E., Hosny O. Optimization of Urban Water Consumption in Residential Buildings. *Sustainability.* 2023. Vol. 15 (10). P. 7952. https://doi.org/10.3390/su15107952.

Azabache Y., Rojas K., Irigoín S., Rodriguez R., Quispe B. Proposal for a hydraulic system for reusing gray water that would reduce drinking water consumption in family homes. *Manglar.* 2020. https://doi.org/10.17268/manglar.2020.026.

Chougule S., Swaminathan A., Bamane P. Laboratory Testing Pros and Cons Over Natural Grey Water and Synthetic Grey Water Testing. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology.* 2023. Vol. 11(5). P. 1404–1411. https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.50119.

Hajlaoui H., Akrimi R., Guesmi A., Hachicha M. Assessing the Reliability of Treated Grey Water Irrigation on Soil and Tomatoes (Solanum lycopersicum L.). *Horticulturae.* 2022. Vol. 8 (10). P. 981. https://doi.org/10.3390/horticulturae8100981.

McCann H., Pisano G., Beltrachini L. Variation in Reported Human Head Tissue Electrical Conductivity Values. *Brain Topography.* 2019. Vol. 32. P. 825–858. https://doi.org/10.1007/s10548-019-00710-2.

Noutsopoulos C., Andreadakis A., Kouris N. Greywater characterization and loadings – Physicochemical treatment to promote onsite reuse. *Journal of Environmental Management.* 2017. Vol. 203 (2). P. 655–663. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.056.

Prajapati B., Jensen M., Jørgensen N., Petersen N. Grey water treatment in stacked multi-layer reactors with passive aeration and particle trapping. *Water research.* 2019. Vol. 161. P. 181–190. https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2019.05.096.

Woltersdorf L., Zimmermann M., Deffner J., Gerlach M., Liehr S. Benefits of an integrated water and nutrient reuse system for urban areas in semi-arid developing countries. *Resources Conservation and Recycling.* 2018. Vol. 128. P. 382–393. https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2016.11.019.

Yoonus H., Al-Ghamdi S. Environmental performance of building integrated grey water reuse systems based on Life-Cycle Assessment: A systematic and bibliographic analysis. *The Science of the total environment.* 2020. Vol. 712. P. 136535. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136535.

References

Valerko, R. A., Herasymchuk, L. O., Belmeha, I. V., & Shatsylo, Y. H. (2024). Zeleni dakhy yak napriam naukovykh doslidzhen [Green roofs as a direction of scientific research]. *Derzhavnyi universytet "Zhytomyrska politekhnika" [Zhytomyr Polytechnic State University]* [in Ukrainian].

Herasymchuk, P.O., Valerko, R.A., & Veselskyi, O.O. (2024). Perevahy zelenykh dakhiv ta yikh rozrakhunok [Advantages of green roofs and their calculation]. *Ahrarni innovatsii [Agrarian Innovations]*, 23, 48–53. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.23.7 [in Ukrainian].

Rybak, O. S. (2023). "Zelenyi dakh-bioriznomanittia": tekhnolohii budivnytstva, utrymannia, obsluhovuvannia ta osoblyvosti kontroliu biotychnoi skladovoi ["Green roof-biodiversity": construction technologies, maintenance, service and features of biotic component control]. *Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho [Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University]*, 5, 35–41. https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.5.4 [in Ukrainian].

Rybak, O.S., & Patseva, I.H. (2023). Ekolohichni osnovy analizu vplyvu "zelenykh" dakhiv na miskyi klimat v urbotsenozakh [Ecological foundations of the analysis of the influence of "green" roofs on urban climate in urban cenoses]. *Visnyk khmelnytskoho natsionalnoho universytetu [Herald of Khmelnytskyi National University]*, 5 (2), 103–107. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-325-5-103-107 [in Ukrainian].

Rybak, O.S., & Patseva, I.H. (2023). Zeleni dakhy yak element detsentralizovanoho upravlinnia doshchovoiu vodoiu [Green roofs as an element of decentralized rainwater management]. *Problemy khimii ta staloho rozvytku [Problems of Chemistry and Sustainable Development]*, 2, 40–46. https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-2-6 [in Ukrainian].

Rybak, O. S., & Patseva, I. H. (2024). Miske horodnytsvo na dakhu – ekolohichne podolannia prodovolchoi kryzy v urbanizovanomu seredovyshchi [Urban roof gardening – ecological overcoming of the food crisis in an urbanized environment]. *Ahrarni innovatsii [Agrarian Innovations]*, 24, 135–140. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.24.19 [in Ukrainian].

Amin, M., Dorra, E., & Hosny, O. (2023). Optimization of Urban Water Consumption in Residential Buildings. *Sustainability,* 15 (10), 7952. https://doi.org/10.3390/su15107952 [in English].

Azabache, Y., Rojas, K., Irigoín, S., Rodriguez, R., & Quispe, B. (2020). Proposal for a hydraulic system for reusing gray water that would reduce drinking water consumption in family homes. *Manglar*. https://doi.org/10.17268/manglar.2020.026 [in English].

Chougule, S., Swaminathan, A., & Bamane, P. (2023). Laboratory Testing Pros and Cons Over Natural Grey Water and Synthetic Grey Water Testing. International *Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 11 (5), 1404–1411. https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.50119 [in English].

Hajlaoui, H., Akrimi, R., Guesmi, A., & Hachicha, M. (2022). Assessing the Reliability of Treated Grey Water Irrigation on Soil and Tomatoes (Solanum lycopersicum L.). *Horticulturae,* 8 (10), 981. https://doi.org/10.3390/horticulturae8100981 [in English].

McCann, H., Pisano, G., & Beltrachini, L. (2019). Variation in Reported Human Head Tissue Electrical Conductivity Values. *Brain Topography*, 32, 825–858. https://doi.org/10.1007/s10548-019-00710-2 [in English].

Noutsopoulos, C., Andreadakis, A., & Kouris, N. (2017). Greywater characterization and loadings – Physicochemical treatment to promote onsite reuse. *Journal of Environmental Management*, 203 (2), 655–663. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.056 [in English].

Prajapati, B., Jensen, M., Jørgensen, N., & Petersen, N. (2019). Grey water treatment in stacked multi-layer reactors with passive aeration and particle trapping. *Water Research*, 161, 181–190. https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2019.05.096 [in English].

Woltersdorf, L., Zimmermann, M., Deffner, J., Gerlach, M., & Liehr, S. (2018). Benefits of an integrated water and nutrient reuse system for urban areas in semi-arid developing countries. *Resources Conservation and Recycling*, 128, 382–393. https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2016.11.019 [in English].

Yoonus, H., & Al-Ghamdi, S. (2020). Environmental performance of building integrated grey water reuse systems based on Life-Cycle Assessment: A systematic and bibliographic analysis. *Science of the Total Environment*, 712, 136535. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136535 [in English].

Отримано: 24.10.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

УДК 504.3.054:629.113
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.25

УРБОЕКОСИСТЕМА ТЕРНОПОЛЯ В УМОВАХ ТРАНСПОРТНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

А. С. Серкіз[1]

У даній статті здійснено дослідження автотранспортного навантаження на урбоекосистему Тернополя. За останні роки спостерігається зростання одиниць автотранспорту у місті. Тому розгляд цього питання є актуальним у сучасних умовах. Отримати комплексний аналіз показників урбоекосистеми для розуміння наявної ситуації є основною метою праці. У роботі розглянуто площу міста, чисельність та щільність наявного населення. Відображено актуальні дані, щодо наявних промислових об`єктів Тернополя. Досліджено структуру викидів за попередні роки та сьогодення. Крім статистичного аналізу наведено дані власного моніторингу кількості одиниць автотранспорту за добу на центральних вулицях (вулиця Руська, проспект Степана Бандери) міста. Показники, за останні роки отримані методом польових досліджень, а також за допомогою роботи згорткової нейронної мережі (шляхом аналізу відео із вебкамер, розташованих на вулицях міста). Сьогодні збір матеріалу щодо одиниць транспорту здійснюється методом польових досліджень, так як за умов військового стану доступ до вебкамер є обмеженим (програму можна буде знову використовувати, після завершення воєнних дій на території України). Розглянуто впровадження стандартів "євро" для України та їх вплив на токсичні речовини у відпрацьованих газах. Створено графік тенденції викидів токсичних речовин від пересувних джерел. Встановлено причину зниження рівня викидів від пересувних джерел з 2005 до 2015 років. Опрацьовано статистичні дані, щодо зростання площі міста та зміни відсотка зелених насаджень впродовж декількох років. Здійснено порівняння структури бюджету міста за 2018 та 2021 роки. Встановлено відсутність збалансованого розподілу видатків. Проаналізувавши інформацію, що зібрана у цій праці, можна значно покращити стан екосистеми міста, шляхом застосування змін, що випливають з висновків.

Ключові слова: *урбоекосистема, транспортне навантаження, структура забруднень, асиміляція, зелена зона.*

URBAN ECOSYSTEM OF TERNOPIL IN CONDITIONS OF TRANSPORTS LOAD

A. S. Serkiz

In this article, a study was carried out on the impact of motor vehicles on the urban ecosystem of Ternopil. In recent years, the number of motor vehicles in the city has increased. Therefore, consideration of this issue is relevant in modern conditions. The main objective of the work is to

[1] аспірантка кафедри геоекології та гідрології
(Національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка, м. Тернопіль)
e-mail: anastasiaserkiz@gmail.com
ORCID: 0009-0008-1308-4625

obtain a comprehensive analysis of urban ecosystem indicators in order to understand the current situation. The paper considers the area of the city, the number and density of the existing population. Current data on existing industrial facilities in Ternopil are presented. The structure of emissions for previous years and the present was studied. In addition to the statistical analysis, data from our own monitoring of the number of vehicles per day on the central streets of the city (Ruska Street, Stepan Bandera Avenue) are presented. Indicators obtained in recent years by the method of field research, as well as with the help of a convolutional neural network (by analysing videos from web cameras located on the streets of the city). Today, the collection of material related to transport units is carried out by the method of field research. Since under the conditions of martial law access to webcams is limited (the programme will be able to be used again after the end of hostilities on the territory of Ukraine). The implementation of «Euro» standards for Ukraine and their impact on toxic substances in exhaust gases are considered. A graph of the development of emissions of toxic substances from mobile sources was prepared. The reason for the decrease in the level of emissions from mobile sources from 2005 to 2015 was identified. Statistical data on the growth of the city area and changes in the percentage of green areas over several years have been developed. The structure of the city budget for 2018 and 2021 was compared. It was found that there is no balanced distribution of expenditure. By analysing the information collected in this work, it is possible to significantly improve the state of the city's ecosystem by applying the changes resulting from the findings.

Key words: *urboecosystem of Ternopil, impact of motor vehicles, the structure of emissions, assimilation, green space.*

Вступ

Забруднення атмосфери чинить вплив на здоров`я населення, стан вод, ґрунти, рослинний та тваринний світ. Внаслідок значної кількості непередбачуваних обставин для нашої країни, місту необхідно витримувати інтенсивніші навантаження, ніж передбачалося раніше. Тернопіль знаходиться у західній частині країни. Від лютого 2022 року місто надало прихисток багатьом громадянам з інших частин України. Зростання чисельності населення призвело до зростання кількості транспортних засобів. Як наслідок зросла кількість заторів та викидів шкідливих речовин, що утворюються під час роботи пересувних джерел транспорту. Підвищився рівень шумового забруднення, спостерігається перевантаження транспортних шляхів та ін. Внаслідок ситуації, що виникла проведення дослідження є актуальним питанням сьогодення. Метою та завданням цієї роботи є: визначити вплив пересувних джерел на формування забруднень урбоекосистеми міста Тернополя. Розробка рекомендацій щодо покращення ситуації у місті та шляхів зменшення рівня викидів у майбутньому.

Починаючи з 2019 року у своїх працях я здійснюю аналіз впливу транспортних забруднень на місто Тернопіль. «Екологічний стан повітряного середовища міста Тернополя на прикладі мікрорайону "Східний"» (Серкіз, 2019), «Геоекологічні аспекти автотранспортного забруднення і продукування парникових газів у м. Тернополі» (Серкіз, 2022), «Порівняльний аналіз забруднення атмосферного повітря автотранспортом у містах Тернопіль та Луцьк» (Серкіз, 2023).

Аналіз геоекологічних параметрів компонентів навколишнього середовища міста Тернопіль здійснено у праці «Геоекологічні параметри компонентів навколишнього середовища міста Тернополя» (Царик та ін., 2019). Характеристики міста Тернопіль проаналізовано у працях «Картографічне моделювання транспортних потоків у м. Тернопіль» (Рудакевич, 2018). Для більш глибокого розуміння ситуації необхідно розглянути аналіз інших міст України. В статті «Сучасний стан забруднення атмосферного повітря м. Луцька» (Фесюк і Мороз, 2021), розглянуто проблеми міста Луцьк. У статті «Просторово-часова оцінка екологічного ризику від забруднення атмосферного повітря м. Харкова» (Максименко та ін., 2020) досліджено проблеми забруднення атмосферного повітря міста Харків.

Матеріал і методи

Для досягнення поставленої мети та вирішення завдань у цій роботі було використано наступні методи досліджень.

Здійснено аналіз статистичних даних у різних літературних та інтернет-джерелах. Зважаючи, що загальна статистична інформація після 2015 року стосовно забруднення автотранспортом відсутня. Проведено збір показників методом польових досліджень. Усі дані зібрано самостійно. Спостереження за транспортними потоками здійснено в контрольних точках міста впродовж 2019–2023 років. Контрольні точки обрано

на основі їх розташування в ключових транспортних вузлах міста. Спостереження проводилися о 08:00, 09:00, 16:00, 21:00 та 00:00 у різні пори вказаних років. Після отримання даних, з усіх показників був виведений середній за добу. Також визначалися пікові години та дні навантажень. Спостереження проведено в 7-ми контрольних точках. Протяжність однієї контрольної ділянки становить 100 метрів (рис. 1).

Перелік контрольних точок спостереження: 1. Перехрестя вулиця Руська – вулиця Старий Поділ (нижче Церква воздвиження Чесного Хреста ПЦУ); 2. Вулиця Руська, 6 (Школа-ліцей №6 ім. Н. Яремчука); 3. Перехрестя вулиця Руська – вулиця Замкова (в сторону Кооперативного торговельно-економічного коледжу); 4. Вулиця Руська, 20; 5. Перехрестя вулиця Руська, 20 – бульвар Тараса Шеченка, 24 (Центральний універсальний магазин); 6. Перехрестя проспект Степана Бандери – вулиця Слівенська – вулиця Коновальця; 7. Проспект Степана Бандери, 79 в бік Збаразького кільця.

Для встановлення площі зелених насаджень використано ретроспективний аналіз, який застосував у дисертаційній роботі Кузик Ігор Романович (Кузик, 2021). Цей метод дозволяє не лише визначити зміну площі зелених насаджень упродовж кількох десятиліть. Також він дає змогу виявити основні тенденції впливу урбанізації та забудови на екологічний баланс міста.

Для оцінки стійкості міста досліджено видатки міського бюджету на екологічні ініціативи та інфраструктуру.

Для оцінки стійкості міста проаналізовано видатки міського бюджету. Досліджено розподілення коштів на екологічні ініціативи та покращення транспортної інфраструктури (2018 р. та 2021 р.).

Результати та обговорення

Площа міста Тернополя становить 72 км^2. Середня чисельність наявного населення міста станом на 1 січня 2021 року становила 224 471 осіб (Головне управління …, 2022). Щільність населення становить 3117 осіб/км^2 (01.01.2021 р.).

За даними додатку до рішення міської ради 7/41/33 «Паспорт Програми охорони навколишнього природного середовища Тернопільської міської територіальної громади на 2020–2023» (Паспорт програми …, 2024). Відмічено, що екологічна ситуація найбільше визначається автотранспортом.

Аналіз впливу автотранспорту.

За видами транспорту викиди забруднюючих речовин розподіляються наступним чином: 58% від загальної кількості викидів припадає на автомобільний транспорт, 25% – на залізничний, 14% – на дорожньо-будівельний комплекс, близько 2% – на повітряний транспорт і менше 1% – на річковий та морський (Серкіз, 2019).

Щоб проаналізувати тенденцію викидів, розглянуто динаміку змін 2000–2015 рр. (табл. 1).

Здійснивши аналіз викидів від пересувних джерел забруднення (див. табл. 1), створено графік з відображенням динаміки змін рівня викидів забруднюючих речовин з 2000 року по 2015 рік (рис. 2). Для побудови тренду використано метод інтерполяції над наявними даними.

У роботі «Картографічне моделювання транспортних потоків у місті Тернопіль» (Рудакевич, 2018) також наведено дані, що у 2015 р. інтенсивність руху вулицями міста

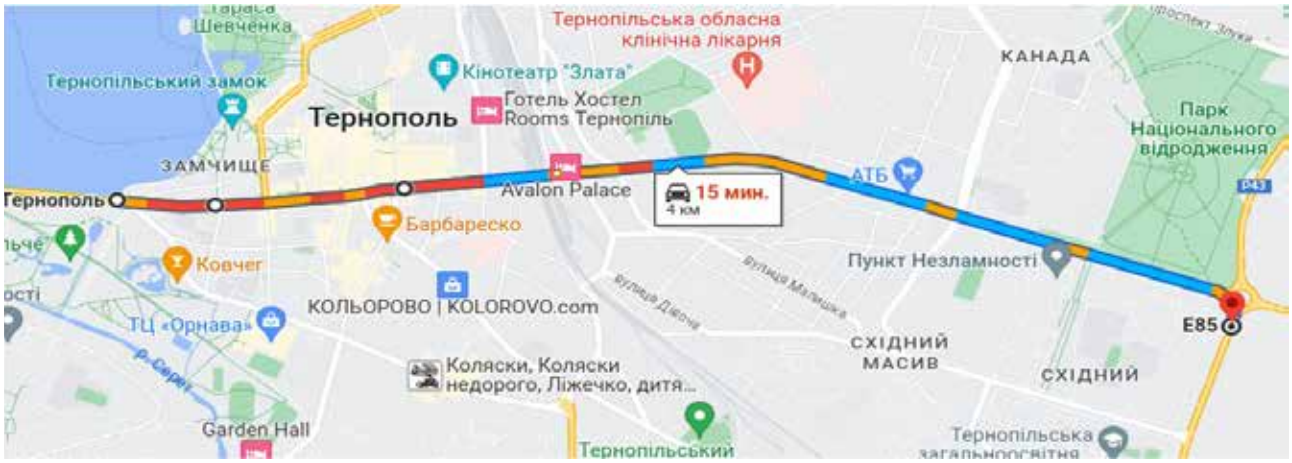


Рис. 1. Маршрут, яким розташовані контрольні точки, за якими здійснено спостереження (2019–2023 рр.)

Таблиця 1

Динаміка викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від пересувних джерел і виробничої техніки міста Тернопіль (крім вуглецю діоксиду), тонн (Архів …, 2015; Серкіз, 2022)

Роки	**Обсяги викидів забруднюючих речовин пересувними джерелами (крім вуглецю діоксиду)**
2000 р.	11400
2005 р.	14600
2010 р.	12000
2012 р.	12090,8
2013 р.	11218,53
2014 р.	10660,02
2015 р.	10400

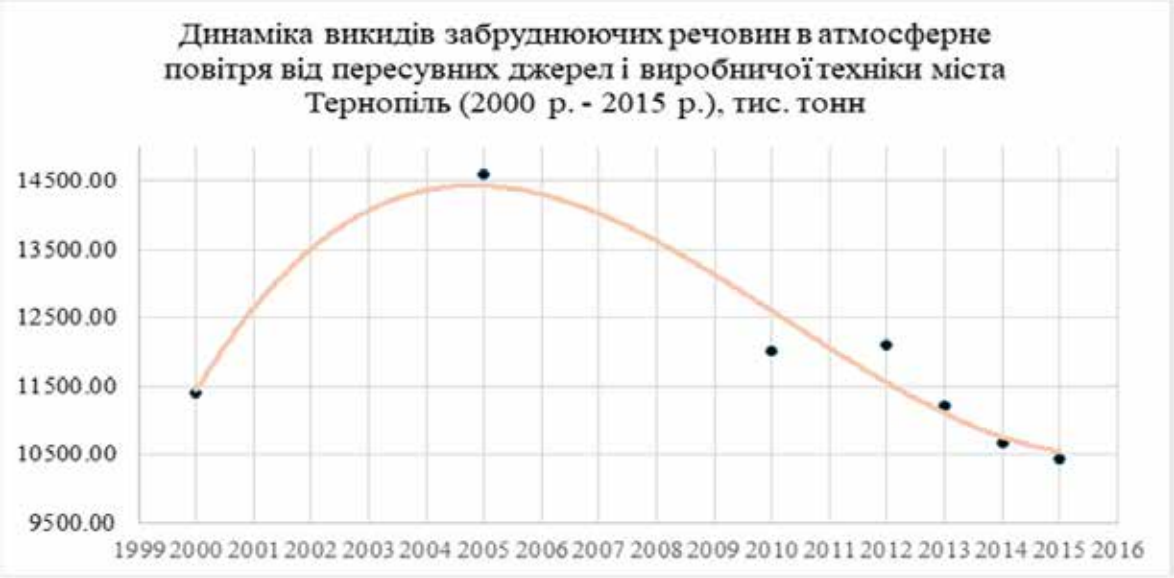


Рис. 2. Динаміка викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від пересувних джерел і виробничої техніки м. Тернопіль (крім вуглецю діоксиду 2000–2015 рр.), тис. тонн

була нижчою на проспекті Злуки, порівняно з 2013 роком. Зменшився також транспортний потік по об'їзній дорозі та її частинах на вулицях С. Будного і 15 Квітня.

Дослідження підкреслює проблеми критичної завантаженості транспортної мережі Тернополя. Відповідно до польових спостережень наведених у роботі, за 2013 р., 2015 р., та 2017 р. вулиці у центральній частині міста (вулиця Замкова, Руська, Острозького) часто перевищували 100% нормативної інтенсивності руху.

В країні поступово впроваджувалися нові Європейські стандарти для автомобілів. Посилювався контроль щодо викидів відпрацьованих газів. Внаслідок цих дій рівень викидів знижувався як по всій країні. Аналогічно показник забруднення зменшувався і у місті. Зміни стандартів для легкових авто України зображено у таблиці 2.

З 2005 року, після «Помаранчевої революції», економіка країни починала стабілізуватися. У 2007–2009 рр. свого піку досягла світова фінансова криза. У свою чергу це обмежило можливість користуватися автомобілями як зазвичай.

Структуру викидів від автомобільного, залізничного транспорту та виробничої техніки у 2012 р. та 2015 р. зображено у таблиці 3 та таблиці 4.

Для розуміння ситуації сьогодення здійснено польові спостереження за навантаженнями від автотранспорту в період 2019–2023 рр. (рис. 3) Польові дослідження

Таблиця 2

Вміст токсичних речовин у вихлопі легкових авто, г/км
(ДП «ДержавтотрансНДІпроект», 2018)

Стандарт	**Дата**	**CO**	**THC**	**NMHC**	**NOx**	**HC+NOx**	**PM**
Дизельні двигуни							
Євро-1	Липень 1992	2,72 (3,16)	-	-	-	0,9(1,13)	0,14(0,18)
Євро-2	Січень 1996	1,0	-	-	-	0,7	0,08
Євро-3	Січень 2000	0,64	-	-	0,50	0,56	0,05
Євро-4	Січень 2005	0,50	-	-	0,25	0,30	0,025
Євро-6	-	-	-	-	-	-	-
Бензинові двигуни							
Євро-1	Липень 1992	2,72(3,16)	-	-	-	0,97(1,13)	-
Євро-2	Січень 1996	2,2	-	-	-	0,5	-
Євро-3	Січень 2000	1,3	0,20	-	0,15	-	-
Євро-4	Січень 2005	1,0	0,10	-	0,08	-	-
Євро-5	Вересень 2009	1,00	0,100	0,068	0,060	-	0,005
Євро-6	-	-	-	-	-	-	-

Таблиця 3

Викиди забруднюючих речовин та діоксиду вуглецю в атмосферне повітря від пересувних джерел за основними видами забруднюючих речовин (2012 р.), тонн (Архів ..., 2012)

Обсяги викидів забруднюючих речовин, усього	**Речовини:**							
	Діоксиду сірки	**Діоксиду азоту**	**Метану**	**Оксиду вуглецю**	**Оксиду азоту**	**Сажі**	**Неметанових летких органічних сполук**	**Крім того, викиди діоксиду вуглецю, тисяч тонн**
12090,8	185,8	1907	36,4	8470,7	17,4	246,9	1225,2	178,9

Таблиця 4

Викиди забруднюючих речовин та діоксиду вуглецю в атмосферне повітря від пересувних джерел за основними видами забруднюючих речовин (2015 р.), тонн (Архів ..., 2015)

Обсяги викидів забруднюючих речовин, усього	**Речовини:**							
	Діоксиду сірки	**Діоксиду азоту**	**Метану**	**Оксиду вуглецю**	**Оксиду азоту**	**Сажі**	**Неметанових летких органічних сполук**	**Крім того, викиди діоксиду вуглецю, тисяч тонн**
10434,5	185,9	1897,9	30,9	7096,7	18,7	249,6	953,5	162,3

проведено за методом кількісного обліку транспортних засобів (див. розділ Матеріал і методи). Середній показник одиниць автотранспорту за кожен рік окремо:

2019 рік – 32 205 одиниць автотранспорту за добу. 2021 рік – 48 978 одиниць автотранспорту за добу. 2023 рік – 52 737 одиниць автотранспорту за добу.

Середній показник викидів для кожної окремої ділянки, за вказані роки.

Польові дослідження свідчать про зростання кількості автомобілів за останні

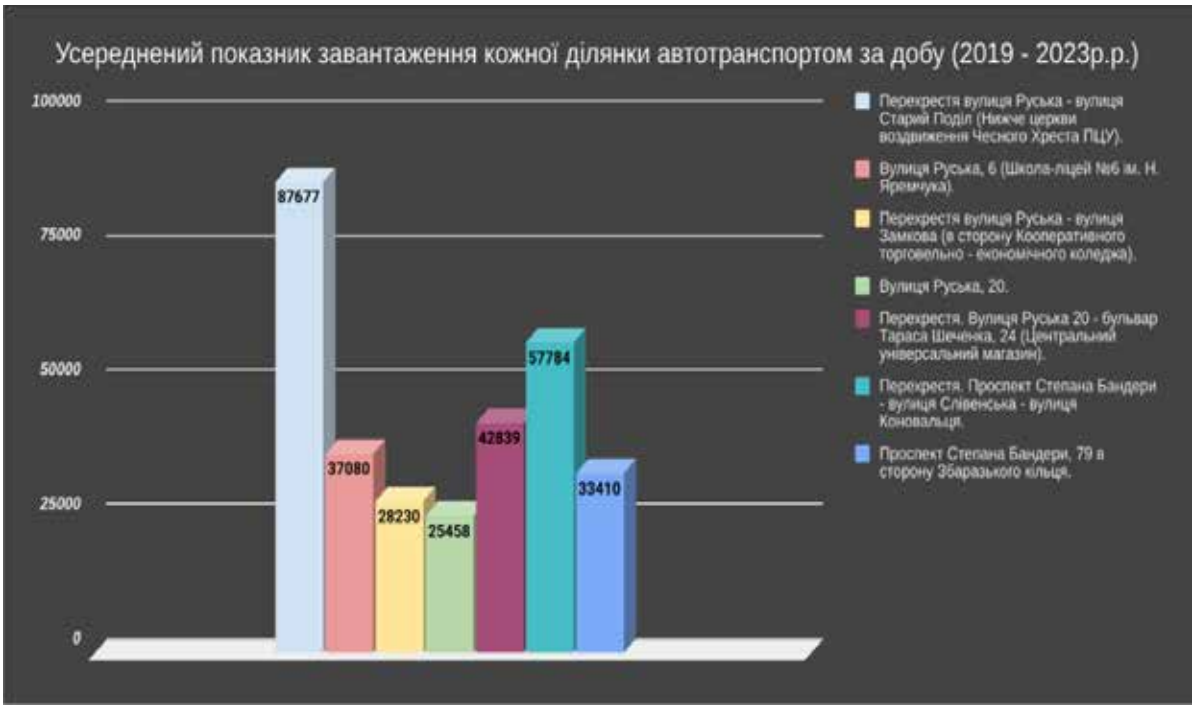


Рис. 3. Усереднений показник завантаження кожної ділянки автотранспортом за добу (2019–2023 рр.)

роки. З 2019 р. до 2023 р. ця цифра збільшилася майже вдвічі.

У місті Луцьк спостерігається схожа тенденція. Фесюк В.О. відзначає, що викиди від автотранспорту у 2020 році значно зросли. Вони становлять 94,5% забруднення атмосферного повітря (Фесюк і Мороз 2021). Вчений вказує на необхідність негайного розв`язання проблем, створених пересувними джерелами. Так як кількість автотранспорту на сьогодні щорічно зростає і це чинить значний вплив на здоров`я населення, питання потребує посиленої уваги.

У статті «Геоекологічні параметри компонентів навколишнього середовища міста Тернополя» (Царик та ін., 2019) вказано, що у місті Тернопіль транспорт є основним джерелом забруднення. Ці викиди включають у себе до 200 найменувань хімічних елементів.

Тернопільський обласний центр гідрометеорології проводить постійні спостереження у 2-х точках: ПСЗ №1 (перехрестя вулиць Бродівської і Збаразької) і ПСЗ №2 (перехрестя вулиць Живова і Микулинецької).

Результатами є наступні показники: забруднення атмосферного повітря пилом, діоксидом сірки, оксидом вуглецю, діоксидом азоту, оксидом азоту, формальдегідом, а також важкими металами (залізо, кадмій, марганець, мідь, нікель, свинець, хром і цинк) і бензапіреном.

Середньорічні концентрації забруднюючих речовин в атмосферному повітрі обласного центру в кратності ГДК становили: по формальдегіду – 1,0 ГДК; пилу – 0,5 ГДК; діоксиду азоту – 1,3 ГДК; оксиду азоту – 0,4 ГДК; оксиду вуглецю – 0,8 ГДК; діоксиду сірки – 0,1 ГДК.

Щодо зелених насаджень у місті, слід розглянути динаміку зміни площі населеного пункту та відсотка озеленення впродовж декількох років (табл. 5).

Наведені вище дані свідчать про те, що з 1994 року до 2017 населений пункт значно збільшив свою площу, проте зменшився відсоток зелених насаджень.

Зростання «зеленої площі» наявне лише до 2014 року, за рахунок приєднання містом нових територій. В наступні роки спостерігалася інтенсивна забудова. До 2014 року показник площі зелених насаджень становив більше 30%, починаючи з 2015 року спостерігалося менше 20% (Кузик, 2019).

За розрахунками професора В.П. Кучерявого (Кучерявий, 2005) для забезпечення киснем 500 осіб потрібен 1 га лісових насаджень. У м. Тернопіль площа лісів складає 357 га (Матеріали звіту …, 2016), для забезпечення киснем жителів

Таблиця 5

Динаміка зміни площі міста та відсотка зелених насаджень (Кузик, 2019)

Рік	**Площа міста**	**Площа зелених насаджень**	**Озеленення**
1994	3500 га (за інформацією видання Тернопільської міської ради «Основи екологічних знань»)	1277 га (за інформацією Видання Тернопільської міської рад «Основи екологічних знань»)	36,5%
2014	5900 га (Екологічний паспорт м. Тернопіль)	1888 га (Концепція комплексного озеленення міста Тернополя)	32%
2015	5220 га (за даними розробників проєкту схеми озеленення міста Тернополя)	1000 га (за даними розробників проєкту схеми озеленення міста Тернополя)	19%
2016	5852 га (Інвестиційний паспорт м. Тернополя)	1000 га (-//-)	17%
2017	7200 га (Вікіпедія)	1000 га (-//-)	14%

міста на 224,417 тис. осіб (Головне …, 2022) необхідно 448,7 га лісових масивів.

Загальна площа рослинності у місті Тернопіль становить 2 690 га (наявна лісопаркова частина) + 7 276 га (наявна лісогосподарська частина) = 9 966 га. За розрахунками дефіцит комплексної зеленої зони міста Тернопіль становить 13 470 га (необхідна площа зелених насаджень) – 9 966 га = 3 504 га (Кузик, 2021).

У місті Тернопіль висаджені рослини характеризуються як напівстійкі до газопилового забруднення (Кузик, 2019). Середня відносна стійкість до газопилових викидів переважаючих деревних насаджень КЗЗМ Тернопіль, становить 96,5 бали (із 200 максимально можливих) (Кузик, 2021). З 14-ти видів рослинності, 8 характеризуються стійкістю, яка у балах нижче 100, 2 види отримали бал 100 та 4 види дерев отримали бал 170/180. Крім того у місті відбулася заміна тополі (показник стійкості тополі – 180 балів), як алергенного виду.

Виробництво міста представлене переважно харчовою і легкою промисловістю, мебельними фабриками, будівництвом та ін. (табл. 6). У Тернополі до 2008-о року працював потужний комбайновий завод, який виробляв бурякозбиральні комбайни. Зараз працює лише невелика його частина.

Світові лідери серед міст сьогодні орієнтуються на стратегію стійкого розвитку міста (sustainable development) (Екодія, 2024). Цей підхід вимагає балансу між економічним розвитком міста, соціальним благополуччям та охороною навколишнього середовища. Для успішного впровадження цієї стратегії необхідним є грамотне формування видатків бюджету.

У 2018 році загальний та спеціальний фонди міста склали 2 454 400 000 гривень

Таблиця 6

Промислові об`єкти міста Тернополя (Вікіпедія, 2024)

Харчова промисловість	ВАТ «ТерА», кондитерська фабрика; ПрАТ «Тернопільський молокозавод»; Тернопільська пивоварня «ОПІЛЛЯ»; Тернопільський завод безалкогольних напоїв.
Легка промисловість	ВАТ Тернопільське об`єднання «Текстерно»; ТОВ ТД «Теркурій», виробник панчішно-шкарпеткових виробів; ВАТ Тернопільська швейна фабрика «Галія»; ВАТ «Вінітекс», завод штучних шкір.
Будівництво	ТОВ «Тернопільбуд»; ТОВ «Добробуд»; Будівельна компанія «Креатор-Буд»; ПАТ «Тернобуддеталь»; ЗАТ «Тернопільський завод залізобетонних конструкцій»; ТОВ «ЕлДом», виробник вікон і дверей.
Інші об`єкти	ВАТ «Ватра»; ТОВ «Шредер»; ВАТ Тернопільський радіозавод «Оріон»; ПАТ «Техінмаш»; ВАТ «Тернопільська фармацевтична фабрика»; КБ «Промінь»; ТОВ «САЮЗ»; Фабрика меблів «НОВА»; ВП «Пасажирське вагонне депо Тернопіль»; ВП «Локомотивне депо Тернопіль»; ТОВ «СЕ Борднетце-Україна»

(два мільярди чотириста п`ятдесят чотири мільйони чотириста тисяч) Тернопільська …, 2024). Розподіл коштів здійснено нерівномірно (рис. 4).

Найбільше коштів спрямовано на сферу освіти та соціальний захист (33% та 26% відповідно). Найменше отримали сфери: культури (3%), транспорту (2%) та молоді і спорту (2%).

У 2021 році загальний бюджет міста становив 2 711 600 000 гривень (два мільярди сімсот одинадцять мільйонів шістсот тисяч) (рис. 5).

Найбільше коштів спрямовано на освіту (46%) та житлово-комунальне господарство (25%). Найменшу кількість розподілено на охорону здоров`я, культуру та молодь і спорт – по 3%.

Висновки

Станом на 2020 рік основними забруднювачами атмосферного повітря у Тернополі є пересувні джерела – автотранспорт.

Рис. 4. Видатки бюджету в розрізі головних розпорядників коштів за 2018 р. (млн. грн.) (Тернопільська …, 2024)

Рис. 5. Видатки бюджету в розрізі головних розпорядників коштів за 2021 р. (млн. грн.) (Тернопільська …, 2024)

Забруднення, яке він спричиняє, становить 72% від усіх викидів. Стаціонарні джерела продукують лише 28% (Паспорт ..., 2024).

Згідно аналізу показників, пік забруднення спостерігається у 2005 році. Це пов`язано з активним зростанням автомобільного парку всієї країни після кризи 1990-х рр. Автомобілі, що імпортувалися в Україну, були старими та не відповідали екологічним стандартам. В той час, паливо також часто не відповідало європейським екологічним нормам (див. табл. 2).

За даними Тернопільського обласного центру гідрометеорології, у структурі викидів у 2020–2023 рр. спостерігається: збільшення вмісту формальдегіду, пилу, діоксиду азоту, оксиду вуглецю, не змінився вміст оксиду азоту та діоксиду сірки (Паспорт..., 2024).

На основі вказаних вище польових досліджень за 2019–2023 роки простежується значне зростання інтенсивності автотранспортних потоків у місті Тернопіль. У 2019 році середній показник становив 32 205 одиниць автотранспорту за добу. У 2023 р. цей показник зріс до 52 737 одиниць на добу. Це свідчить про збільшення транспортного навантаження майже вдвічі за чотири роки.

Дефіцит комплексної зеленої зони міста становить 3 504 га (Кузик, 2021). Це свідчить про недостатнє забезпечення зеленими насадженнями для стабілізації екологічної ситуації. Види рослинності, висаджені у Тернополі, мають помірну стійкість до газопилового забруднення (Кузик, 2021). Необхідним є збільшення площі стійких до забруднень насаджень.

Проаналізувавши бюджет міста за 2018 р. та 2021 р. встановлено: видатки значно змінили свою структуру, та все ж розподіл коштів за сферами не став більш збалансованим (табл. 7).

Майже вдвічі зросли кошти, виділені на житлово-комунальне господарство. Сюди входить також благоустрій та екологія. Це свідчить про збільшення видатків на покращення екологічного стану урбоекосистеми. Видатки на транспорт зросли більше як удвічі, що свідчить про зацікавленість влади покращити транспортну інфраструктуру. Все ж з огляду на зростання кількості автівок у останні роки, необхідним є детальніший аналіз цієї сфери та збільшення частини виділених коштів.

Розподіл бюджетних коштів залишається незбалансованим, що гальмує досягнення стійкого розвитку урбоекосистеми Тернополя.

З огляду на отримані результати, у Тернополі необхідно вдосконалити транспортну інфраструктуру. Зокрема, для розвантаження транспортних шляхів варто дещо змінити транспортні розв`язки та час роботи світлофорів. Слід розширити мережу громадського транспорту, зменшити кількість приватних автомобілів. Варто раціонально розподілити бюджет, зробити його більш прозорим. Необхідно скористатися думкою експертів щодо кожної з сфер та розглянути запропоновані громадою проєкти. У місцях значного навантаження доріг (особливо у час пік) слід розглянути ярусність зелених насаджень. Важливим пунктом також є збільшення відсотка стійких до газопилового забруднення видів рослинних насаджень.

Таблиця 7

Порівняльний аналіз зміни видатків бюджету м. Тернопіль (громади) в розрізі головних розпорядників коштів за 2018 р. та 2021 р. (Тернопільська ..., 2024)

Сфера	2018 р. (грн)	2018 р. (%)	2021 р. (грн)	2021 р. (%)	Зміни у гривнях	Зміни часки у %
Освіта	816 400 000	33	1 260 200 000	46	443 800 000	13
Соціальний захист	642 300 000	26	103 900 000	4	-538 400 000	-22
ЖКГ	340 000 000	14	667 300 000	25	327 300 000	11
Охорона здоров'я	286 600 000	12	78 900 000	3	-207 700 000	-9
Культура	76 700 000	3	81 500 000	3	4 800 000	-
Транспорт	53 100 000	2	146 100 000	5	93 000 000	3
Молодь і спорт	40 400 000	2	83 000 000	3	42 600 000	1
Інші	198 900 000	8	290 700 000	11	91 800 000	3

Список використаної літератури

Архів навколишнє природнє середовище. Державна служба статистики України. Головне управління статистики у Тернопільській області [Електронний ресурс]. URL: http://www.te.ukrstat.gov.ua/arxiv_katalog_ns.html (дата звернення 22.04.2022).

Вікіпедія. Тернопіль. Промисловість [Електронний ресурс]. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%BF%D1%96%D0%BB%D1%8C#%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C (дата звернення 28.09.2024).

Головне управління статистики у Тернопільській області. Чисельність населення (за оцінкою) по районах на 1 січня 2022 року та середня чисельність у 2021 році [Електронний ресурс]. URL: https://www.te.ukrstat.gov.ua/files/DS/arxivDS/DS1_202112.htm (дата звернення 17.09.2024).

ДП «ДержавтотрансНДІпроект». Рекомендації щодо визначення відповідності колісних транспортних засобів екологічним нормам, з урахуванням Закону України № 2612-VIII від 08.11.2018.

Екодія. Як відбудувати країну кращою, ніж була [Електронний ресурс]. URL: https://ecoaction.org.ua/vidbuduvaty-krainu-krashchoiu.htmlgad_source=1&gclid=Cj0KCQjws560BhCuARIsAHMqE0EVjF73H6YDypmQYbHzbPiHBBzyLqvsBMRsyq10gwVDt_ogMXIbBTEaAk5fEALw_wcB (дата звернення 05.07.2024).

Кузик І.Р. Комплексна зелена зона міста Тернопіль: геоекологічні засади сталого функціонування : дис. ... д-ра філософії 103 Науки про Землю; Тернопільський нац. пед. ун-т ім. В. Гнатюка. Тернопіль, 2021. 217 с.

Кузик І.Р. Ретроспективний аналіз зміни площ зелених насаджень у місті Тернопіль. *Міждисциплінарні інтеграційні процеси у системі географічної та екологічної науки:* матеріали міжнародної наук.-практ. конф. присвяченої 25-річчю відкриття спеціальності «Екологія» у Тернопільському національному педагогічному університеті ім. В. Гнатюка (7–8 травня 2019 р.). Наук. ред. Л.П. Царик, М.Я. Сивий, А.В. Кузишин, Я.О. Мариняк. Тернопіль : СМП «Тайп», 2019. с. 90–93.

Кучерявий В.П. Озеленення населених місць: Підручник. Львів : Світ, 2005. 456 с.

Максименко Н., Волкова Л., Кротько А. Просторово-часова оцінка екологічного ризику від забруднення атмосферного повітря м. Харкова. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Сер. Географія.* 2020. № 1 (48). С. 107–120.

Матеріали звіту Головного управління Держгеокадастру у Тернопільській області (форма 6-зем). Структура земельних угідь Тернопільського району та м. Тернопіль станом на 01.01.2016 р. Тернопіль : Головне управління Держгеокадастру у Тернопільській області, 2016.

Паспорт програми охорони навколишнього природного середовища Тернопільської міської територіальної громади на 2020-2023 роки: Додаток до рішення міської ради від 06.12.2019 р. № 7/41/33: станом на 05 березня 2024 р. [Електронний ресурс]. URL: https://ternopilcity.gov.ua/gromadyanam/ekologichna-storinka-mista-ternopolya/ (дата звернення 07.03.2024).

Рудакевич І. Р. Картографічне моделювання транспортних потоків у м. Тернопіль. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету. Серія : географія.* 2018. Вип. 1 (44). С. 71–80.

Серкіз А.С. Геоекологічні аспекти автотранспортного забруднення і продукування парникових газів у м. Тернополі. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету ім. Володимира Гнатюка. Сер. Географія.* 2022. Вип. 1. (52). С. 176–184. https://doi.org/10.25128/2519-4577.22.1.22.

Серкіз А.С. Екологічний стан повітряного середовища міста Тернополя на прикладі мікрорайону "Східний": магістерська дисертація, магістр: 01.10.2019; Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка. Тернопіль, 2019.

Серкіз А.С. Порівняльний аналіз забруднення атмосферного повітря автотранспортом у містах Тернопіль та Луцьк. *Подільські читання-2023: комунікаційні стратегії для реалізації геоекологічних ініціатив та проєктів :* матеріали міжнародної науково-практичної конференції присвяченої 30-річчю першого набору на спеціальність «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування» у Тернопільському національному педагогічному університеті ім. В. Гнатюка (2–3 листопада 2023 р.). Тернопіль : ТНПУ ім. В. Гнатюка, 2023. С. 130–133.

Тернопільська міська рада. Інфографіка бюджету міста Тернопіль [Електронний ресурс]. URL: https://ternopilcity.gov.ua/byudget-ternopolya/infografika-byudgetu-mista-ternopolya/ (дата звернення 18.04.2024).

Фесюк В.О., Мороз І.А. Сучасний стан забруднення атмосферного повітря м. Луцька. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія».* 2021. Вип. 54. С. 250–255. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-26.

Царик Л.П., Царик П.Л., Кузик І.Р., Янковська Л.В. Геоекологічні параметри компонентів навколишнього середовища міста Тернополя. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Географія.* 2019. № 1 (Вип. 46). С. 198–210.

References

Arkhiv navkolyshnie pryrodnie seredovyshche. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. Holovne upravlinnia statystyky u Ternopilskii oblasti [Archive of the natural environment. State Statistics Service of Ukraine. Main Department of Statistics in Ternopil region]. [Electronic resource] URL: http://www.te.ukrstat.gov.ua/arxiv_katalog_ns.html (access date 22.04.2022) [in Ukrainian].

Wikipedia. Ternopil. Promyslovist [Wikipedia. Ternopil. Industry]. [Electronic resource] URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%BF%D1%96%D0%BB%D1%8C#%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C (access date 28.09.2024) [in Ukrainian].

Holovne upravlinnia statystyky u Ternopilskii oblasti. Chyselnist naselennia (za otsinkoyu) po raionakh na 1 sichnia 2022 roku ta serednia chyselnist u 2021 rotsi [Population (estimated) by districts as of January 1, 2022, and average population in 2021]. [Electronic resource] URL: https://www.te.ukrstat.gov.ua/files/DS/arxivDS/DS1_202112.htm (access date 28.09.2024) [in Ukrainian].

DerzhavtotransNDIproekt. Rekomendatsii shchodo vyznachennia vidpovidnosti kolisnykh transportnykh zasobiv ekolohichnym normam, z urakhuvanniam Zakonu Ukrainy № 2612-VIII vid 08.11.2018 [«DerzhavtotransNDIproekt». Recommendations of the technical service on determining the conformity of used wheeled vehicles under commodity code 8703 of the Ukrainian Classifier of Foreign Economic Activity Goods to environmental standards, taking into account the Law of Ukraine № 2612-VIII of November 8, 2018] [in Ukrainian].

Ekodiia. Yak vidbuduvaty krainu krashchoiu, nizh bula [Ecoaction. How to rebuild the country better than it was]. [Electronic resource] URL: https://ecoaction.org.ua/vidbuduvaty-krainu-krashchoiu.html (access date 05.07.2024) [in Ukrainian].

Kuzyk, I.R. (2021). Kompleksna zelena zona mista Ternopil: heoekolohichni zasady staloho funktsionuvannia [Complex green area of Ternopil: geo-ecological principles for sustainable operation]. *Candidate's thesis.* 103 Nauky pro Zemlyu; Ternopilskyi natsionalnyi pedahohichnyi universytet. Ternopil, Ukraina [in Ukrainian].

Kuzyk, I.R. (2019). Retrospektyvnyi analiz zminy ploshch zelenykh nasadzhen u misti Ternopil [Retrospective analysis of changes in the green space area of Ternopil city]. *Mizhdystsyplinarni intehratsiini protsesy u systemi heohrafichnoi ta ekolohichnoi nauky:* materialy mizhnarodnoi nauk.-prakt. konf. prisviacenoi 25-richchiu vidkryttia spetsialnosti «Ekolohiia» u Ternopil'skomu natsional'nomu pedahohichnomu universiteti im. V. Hnatyuka TNPU im. V. Hnatiuka (7-8 travnia 2019 r.) [Interdisciplinary Integration of the International Scientific-Practical Conference Dedicated to the 25th Anniversary of the Establishment of the Ecology Program at Ternopil National Pedagogical University named after V. Hnatyuk (7-8 march 2019)]. In L.P. Tsaryk, M. Ya. Syvyi, A.V. Kuzyshyn, Ya. O. Maryniak. Ternopil: SMP «Taip», pp. 90–93 [in Ukrainian].

Kucheriavyi, V.P. (2005). Ozelenennia naselenykh mist [Urban greening]: Pidruchnyk. Lviv : Svit, pp. 456 [in Ukrainian].

Maksymenko, N., Volkova L., & Krotko A. (2020). Prostorovo-chasova otsinka ekolohichnoho ryzyku vid zabrudnennia atmosfernoho povitria m. Kharkova [Spatio-temporal assessment of environmental risk from air pollution in Kharkiv]. *Naukovi zapysky TNPU imeni Volodymyra Hnatiuka. Ser. Heohrafiia [TNPU named after Volodymyr Hnatyuk, Scientific Notes, Series: Geography],* 1 (48), 107–120 [in Ukrainian].

Materialy zvitu Holovnoho upravlinnia Derzhheokadastru u Ternopilskii oblasti (forma 6-zem). Struktura zemelnykh uhid Ternopilskoho raionu ta m. Ternopil stanom na 01.01.2016 r [Materials

from the report of the Main Department of State Geocadastre in the Ternopil region (form 6-zem). Structure of land use in Ternopil district and the city of Ternopil as of January 1, 2016]. Ternopil [in Ukrainian].

Passport prohramy okhorony navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha Ternopilskoi miskoi terytorialnoi hromady na 2020–2023 roky: Dodatok do rishennia miskoi rady vid 06.12.2019 r. №7/41/33: stanom na 05 bereznia 2024 roku [Environmental Protection Program Passport for the Ternopil City Territorial Community, 2020–2023: Appendix to City Council Resolution No. 7/41/33 of December 6, 2019, as of March 5, 2024]. [Electronic resource] URL: https://ternopilcity.gov.ua/gromadyanam/ekolohichna-storinka-mista-ternopolya/ (access date 07.03.2024) [in Ukrainian].

Rudakevych, I. R (2018). Kartohrafichne modeliuvannia transportnykh potokiv u m. Ternopil [Cartographic modeling of traffic flows in the city of Ternopil]. *Naukovi zapysky TNPU. Seriia: heohrafiia [Ternopil National Pedagogical University named after Volodymyr Hnatyuk, Scientific Notes, Series: Geography],* 1 (44), 71–80 [in Ukrainian].

Serkiz, A.S. (2022). Heoekolohichni aspekty avtotransportnoho zabrudnennia i produkuvannia parnykovykh haziv u m. Ternopoli [Geo-ecological aspects of automotive pollution and greenhouse gas emissions in Ternopil]. *Naukovi zapysky TNPU imeni Volodymyra Hnatyuka. Seriia: Heohrafiia [Ternopil National Pedagogical University named after Volodymyr Hnatyuk, Scientific Notes, Series: Geography],* 1 (52), 176–184. https://doi.org/10.25128/2519-4577.22.1.22 [in Ukrainian].

Serkiz, A.S. (2019). Ekolohichnyi stan povitrianoho seredovyshcha mista Ternopolia na prykladi mikroraionu "Skhidnyi" [Ecological state of the air environment in the city of Ternopil: a case study of the «Skhidnyi» district] (Master's thesis, October 1, 2019). TNPU imeni Volodymyra Hnatyuka [Ternopil National Pedagogical University named after Volodymyr Hnatyuk]. Ternopil [in Ukrainian].

Serkiz, A.S. (2023). Porivnialnyi analiz zabrudnennia atmosfernoho povitria avtotransportom u mistakh Ternopil ta Luts'k [Comparative analysis of air pollution by motor vehicles in the cities of Ternopil and Lutsk]. *Podilski chytannia-2023 [Podolian Readings 2023:* Communication Strategies for Implementing Geo-ecological Initiatives and Projects: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 30th Anniversary of the First Enrollment in the Specialty «Ecology, Environmental Protection, and Sustainable Natural Resource Management» at Ternopil National Pedagogical University named after V. Hnatiuk (November 2–3, 2023)]. Ternopil, pp. 130–133 [in Ukrainian].

Ternopilska miska rada. Infohrafika budgetu mista Ternopil [Ternopil City Council. Infographics of the budget of the city of Ternopil]. [Electronic resource] URL: https://ternopilcity.gov.ua/byudget-ternopolya/infografika-byudgetu-mista-ternopolya/ (access date 18/04/2024) [in Ukrainian].

Fesiuk, V.O., & Moroz, I.A. (2021). Suchasnyi stan zabrudnennia atmosfernoho povitria m. Lutsk [The current state of air pollution in the city of Lutsk]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V. N. Karazina. Seriia "Geolohiia. Geohrafiia. Ekolohiia" [Bulletin of Kharkiv National University named after V.N. Karazin. Series «Geology. Geography. Ecology»],* 54, 250–255. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-26 [in Ukrainian].

Tsaryk, L.P., Tsaryk, P.L., Kuzyk, I.R., & Yankovska L.V. (2019). Heoekolohichni parametry komponentiv navkolyshnoho seredovyshcha mista Ternopil [Geo-ecological parameters of the components of the environment of Ternopil]. *Naukovi zapysky TNPU imeni Volodymyra Hnatyuka. Seriia: Heohrafiia [Scientific notes of Ternopil National Pedagogical University named after Volodymyr Hnatyuk. Series: Geography],* 1 (46), 198–210 [in Ukrainian].

Отримано: 14.10.2024
Прийнято: 18.11.2024

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 10
Український журнал природничих наук
№ 10

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

УДК 502+574
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.26

ПРИБЕРЕЖНО-ВОДНА ТА БОЛОТНА РОСЛИННІСТЬ ГІРНИЧИХ ОБ'ЄКТІВ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПОЛІССЯ

І. В. Хом'як[1], В. В. Коніщук[2]

Стаття присвячена вивченню фітоценотичного різноманіття прибережно-водної та болотної рослинності на території гірничих виробітків Центрального Полісся. Метою статті є встановлення синтаксономічної різноманітності та особливостей поширення прибережно-водної та болотної рослинності на території гірничих виробітків Центрального Полісся. Відповідно до мети були поставлені такі завдання: класифікувати рослинність прибережно-водної та болотної рослинності на території гірничих виробітків Центрального Полісся; визначити фітоценотичну різноманітність рослинних угруповань прибережно-водної та болотної рослинності на території гірничих виробітків Центрального Полісся; встановити особливості розміщення прибережно-водної та болотної рослинності на території гірничих виробітків Центрального Полісся. Матеріалами дослідження є геоботанічні описи, створені стаціонарним, напівстаціонарним та маршрутно-експедиційним способами на території гірничих виробітків Центрального Полісся в 2019–2024 роках. Класифікація рослинності здійснена за принципами школи Браун-Бланке. Під час дослідження нами було виявлено прибережно-водну та болотну рослинність на 29 кар'єрах із 37 обстежених, що становить 78 %. Такі високі показники вказують на сприятливі умови для формування цього типу рослинності піч час добування корисних копалин відкритим способом на території Центрального Полісся. Прибережно-водна та болотна рослинність на території гірничих виробітків Центрального Полісся належить до 3 класів, 7 порядків, 10 союзів, 26 асоціацій, визначених за системою Браун Бланке. Найвищий рівень фітоценотичного різноманіття характерний для класів рослинних угруповань Phragmiti-Magnocaricetea (88%), Scheuchzerio palustris-Caricetea fuscae (8%) та Isoëto-Nanojuncetea (4%). На рівні асоціацій найчастіше зустрічаються ті, які належать до класу Phragmiti-Magnocaricetea. Так асоціацію Phragmitetum australis спостерігаємо в 16,8% локалітетів; Typhetum angustifoliae – 13,5%; Typhetum latifoliae – 9,7%; Glycerietum fluitantis – 8,4%. Ключовим фактором, який впливає на фітоценотичне різноманіття кар'єрів, є наявність у безпосередній близькості великого числа природних боліт. Прибережно-водна та болотна рослинність на території кар'єрів Центрального Полісся здебільшого носить екотонний характер, є маловидовим із низьким проєктивним покриттям діагностичних видів

[1] кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: khomyakivan@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0080-0019
[2] доктор біологічних наук, професор,
завідувач відділу охорони ландшафтів, збереження біорізноманіття і природозаповідання
(Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ)
e-mail: konishchuk_vasyl@ukr.net
ORCID: 0000-0003-4115-5642

та із невеликими площами суцільних масивів. У більшості випадків тут не зустрічаються описи, які можна віднести до номенклатурного типу.

Ключові слова: *фітоценози, відновлення екосистем, кар'єр, ветланди.*

COASTAL AND SWAMP VEGETATION OF MINING SITES IN THE CENTRAL POLISSIA

I. V. Khomiak, V. V. Konishchuk

The article is devoted to studying the phytocoenotic diversity of coastal-water and swamp vegetation in the territory of the Central Polissia mining. The purpose of the article is to study the syntaxonomic diversity and features of the distribution of coastal-water and swamp vegetation in the territory of the Central Polissia mining areas. In accordance with the purpose, the following tasks were set: to classify the vegetation of coastal-water and swamp vegetation on the territory of the Central Polissia mine workings; to study the phytocenotic diversity of plant groups of coastal water and swamp vegetation in the territory of the Central Polissya mining; to study the peculiarities of the placement of coastal water and swamp vegetation on the territory of the Central Polissia mining operations. The research materials are geobotanical descriptions created by stationary, semi-stationary, and route-expedition methods in the territory of the Central Polissia mining in 2019–2024. Vegetation classification was carried out according to the principles of the Brown-Blanke school. During the research, we found coastal water and swamp vegetation in 29 quarries out of 37 examined, which is 78%. Such high indicators indicate favorable conditions for the formation of this type of vegetation during the open mining of minerals in the territory of the Central Polissia. Coastal water and swamp vegetation on the territory of the Central Polissia mine belongs to 3 classes, 7 orders, 10 unions, 26 associations, defined according to the Braun Blanche system. The highest level of phytocenotic diversity is characteristic of the classes of plant groups Phragmiti-Magnocaricetea (88%), Scheuchzerio palustris – Caricetea fuscae (8%), and Isoëto-Nanojuncetea (4%). At the level of associations, those belonging to the Phragmiti-Magnocaricetea class are most common. Thus, the Phragmitetum australis association is observed in 16.8% of localities; Typhetum angustifoliae – 13.5%; Typhetum latifoliae – 9.7%; Glycerietum fluitantis – 8.4%. The key factor affecting the phytocenotic diversity of quarries is the presence of a large number of natural swamps in the immediate vicinity. Coastal water and swamp vegetation on the territory of the Central Polissia quarries is mostly ecotonic in nature, sparse in species with low projective coverage of diagnostic species, and small areas of continuous massifs. In most cases, there are no descriptions that can be attributed to the nomenclature type.

Key words: *phytocenoses, restoration of ecosystems, quarry, wetlands.*

Вступ

Збереження видового та оселищного різноманіття – це одна із ключових задач сьогодення. Його величина має регіональні відмінності та залежна від інтенсивності та особливостей антропогенного впливу. Одним із ключових регіонів Європи, які дозволяють реалізовувати збереження біорізноманіття з найвищими показниками ефективності є Полісся. Крім того, воно має потужний вплив на регіональний мезоклімат та водорегулювання.

Окремі частини Полісся досить відмінні, як за кількісними, так і якісними характеристиками біорізноманіття. Серед них, як специфічний регіон виділяється Центральне (Житомирське) Полісся. Воно має різноманітні ґрунтові умови та складний мікрорельєф, пов'язаний із впливом північної частини Українського кристалічного щита на південну частину Поліської низовини. Річки цієї частини Полісся протікають через розщелини між блоками цієї геологічної структури. Це розширює кількість екологічних ніш для видів різного походження: бореальних, неморальних, монтанних та середземноморських. Ще однією особливістю Центрального Полісся є велике число гірничих підприємств, які здійснюють видобуток корисних копалин відкритим способом. З одного боку, під час активного видобутку відбувається знищення або серйозне порушення рослинного покриву. З іншого боку, з'являються нові форми мікрорельєфу та едафічних умов, які призводять до зміни його видового та синтаксономічного складу.

Класична рекультивація передбачає на місці виробітку відновлювати орні землі та лісові насадження. Однак, в окремих випадках, такі заходи вимагатимуть значних витрат матеріальних та фінансових ресурсів. З іншого боку, в результаті природного

відновлення рослинності на території із різноманітними мікрорельєфними та едафічними умовами ми отримуємо дефіцитні для регіону природні угіддя із високим ландшафтним та природним різноманіттям.

Однією із найбільш цікавих та актуальних питань є виникнення та розвиток ветландів, як частини новоутворених або потенційних оселищ на місці гірничих виробітків (Коніщук, 2010). Така діяльність має декілька потужних впливів на формування водно-болотних угідь (Тимченко і Хом'як, 2019). По-перше, утворюються заглиблення нижче рівня залягання ґрунтових вод, куди збирається атмосферна та підземна волога. По-друге, під час роботи кар'єру відбувається постійний скид зворотних вод, що утворює або підживлює невеличкі струмки та ставки (Helgeson, 2009). По-третє, переміщення водонепроникних порід призводить до накопичення вологи на поверхні ґрунту навколо кар'єру. Такі умови є сприятливими для формування прибережно-водної та болотної рослинності, яка є основою для функціонування ряду оселищ чи їхніх комплексів. Виходячи із цього, вивчення різноманітності та динаміки прибережно-водної та болотної рослинності в районі кар'єрів є актуальною екологічною задачею сьогодення (Shumygai et al. 2021).

Мета і завдання дослідження. Метою статті є встановлення синтаксономічної різноманітності та особливостей поширення прибережно-водної та болотної рослинності на території гірничих виробітків Центрального Полісся.

Відповідно до мети були поставлені такі завдання:

- Класифікувати рослинність прибережно-водної та болотної рослинності на території гірничих виробітків Центрального Полісся.
- Визначити фітоценотичну різноманітність рослинних угруповань прибережно-водної та болотної рослинності на території гірничих виробітків Центрального Полісся.
- Встановити особливості розміщення прибережно-водної та болотної рослинності на території гірничих виробітків Центрального Полісся.

Матеріал і методи

Матеріалами дослідження є геоботанічні описи, створені на території гірничих виробітків Центрального Полісся в 2019–2024 роках. Польові дослідження проводилися стаціонарними, маршрутно-експедиційними та напівстаціонарними способами (Якубенко та ін., 2020). Дослідження проводилися в зоні впливу гірничих підприємств, які здійснюють видобуток корисних копали відкритим способом.

Назви видів рослин наводяться відповідно до останнього чек-листа (Mosyakin & Fedoronchuk, 1999). Класифікація рослинності здійснювалася за еколого-флористичною класифікацією швейцарсько-французької школи Браун Бланке (Westhoff & Maarel, 1973; Дубина, 2019). Стандартні геоботанічні описи оброблялися із застосуванням пакету програм TURBOVEG for Windows (Hennekens, 2009). Значення чинників середовища встановлювалися синфітоіндикаційним методом із використанням програми «Simargl 1.12» (Хом'як та ін., 2020).

Величина фітоценотичного різноманіття визначалися на рівні класів рослинних угруповань за часткою, яку займають асоціації, що належать цим класам до загального числа асоціацій усієї досліджуваної території.

Результати

Під час дослідження нами було виявлено прибережно-водну та болотну рослинність на 29 кар'єрах із 38 обстежених, що становить 76%. Такі високі показники вказують на сприятливі умови для формування цього типу рослинності піч час добування корисних копалин відкритим способом на території Центрального Полісся. Разом із тим, наші спостереження вказують на деякі відмінності в походженні екотопів сприятливих для болотної та прибережно-водної рослинності. Тут можна виділити чотири групи екотопів. До першої належать узбережжя водойм розміщених на дні кар'єру. Рослинні угруповання утворюються в них лише за умови зниження інтенсивності або й повного припинення гірничих робіт. Під час активного видобутку вода звідси відкачується до її мінімального рівня, що заважає формуванню угруповань вищих судинних рослин.

Друга група пов'язана із скидом зворотних вод. Технологічна процедура передбачає відведення води за допомогою потужних насосів за межі виробітку. Часто з метою економії засобів, якщо дозволяють ґрунтові умови та рельєф далі вода рухається самостійно через проритий канал. Вона потрапляє у водойму відстійник звідки переміщується до природних водойм. Якщо шлях до відстійника і після нього пролягає через відкритий канал, то часто в таких місцях формуються невеликі осередки прибережно-водних ценозів. Ще частіше це відбува-

ється по периметру водойми відстійника. В окремих випадках такий тип рослинності займають тут більше половини площі плеса і піднімаються на береги водойми (Voulvoulis, 2018).

Третя група екотопів виникає в результаті утворення поглиблень в рельєфі та переміщення ближче до поверхні водонепроникних порід. Таке явище пов'язано із особливостями видобутку кристалічних гірських порід, поширеним на території Житомирського Полісся. Видобуток ведеться в тих місцях, де ці породи залягають якнайближче до денної поверхні. Таке їхнє розміщення історично заважало вільному проникненню води. В результаті цього утворювалися алювіальні породи нанесені із водотоками, змішані із продуктами вивітрювання кристалічних порід (жерсть). Під час видобутку корисних копалин ці осадові породи (розкрив кар'єру) переміщуються у відвали. В процесі виконання такої процедури в околицях кар'єру та на самих відвалах утворюються ділянки із тимчасовим або сталим накопичуванням води. В процесі самовідновлення природної рослинності ці мікрорельєфні утвори вкриваються болотною та прибережно-водною рослинністю.

Четверта група екотопів – це природні водойми, які безпосередньо прилягають до кар'єрів та знаходяться під помітним їхнім впливом. За умов дотримання чинного законодавства природна рослинність на ділянках в зоні впливу та за її межами мало відрізняється.

Прибережно-водна та болотна рослинність на території гірничих виробітків Центрального Полісся належить до 3 класів, 7 порядків, 10 союзів, 26 асоціацій, визначених за системою Браун Бланке. Найвищий рівень фітоценотичного різноманіття характерний для класів рослинних угруповань Phragmiti-Magnocaricetea (88%), Scheuchzerio palustris-Caricetea fuscae (8%) та Isoëto-Nanojuncetea (4%) (табл. 1). При цьому, було зафіксовано 146 локалітетів для класу Phragmiti-Magnocaricetea, 6 – для Isoëto-Nanojuncetea і лише 3 для Scheuchzerio palustris-Caricetea fuscae. Угруповань класів Oxycocco-Sphagnetea та Littorelletea uniflorae жодного разу не було відмічено в наших дослідженнях. Відсутність класичних оліготрофних боліт пояснюється потребою в тривалому періоді необхідному для утворення мохового ярусу. Цей період має супроводжуватися мінімальним андрогенним тиском в районі оліготрофних або дистрофних водойм. Обстежені нами кар'єри могли припиняти свою діяльність на період менших за 30 років. При цьому, на їхній території часто зростав рекреаційний тиск та евтрофікація, яка традиційно його супроводжує. Це саме стосується і рослинності класу Littorelletea uniflorae. Тому, єдине місце, де було зафіксовано угруповання комахоїдних рослин це був Білокоровицький гранітний кар'єр. Однак, тут угруповання сформовані Utricularia australis R. Br. і були класифіковані як типологічний екотон між союзу Utricularion vulgaris (класу Lemnetea) і союзу Sphagno-Utricularion (класу Littorelletea uniflorae) із явною перевагою першого.

На рівні асоціацій також найчастіше зустрічаються ті, які належать до класу Phragmiti-Magnocaricetea. Так асоціацію Phragmitetum australis ми спостерігали в 16,8% локалітетів; Typhetum angustifoliae – 13,5%; Typhetum latifoliae – 9,7%; Glycerietum fluitantis – 8,4% (табл. 2). Види, які відіграють ключову роль в цих фітоценозах, мають відносно широкий екологічний спектр і поширені в районі кар'єрів на території Центрального Полісся. Так Phragmites australis (Cav.) Trin. ex Steud. зустрічається в 68% обстежених об'єктів, Typha angustifolia L. – 55%, Typha latifolia L. – 39%, Glyceria fluitans (L.) R. Br. – 34%. На рівні союзів і порядків, найчастіше, прибережно-водна та болотна рослинність належить до союзу Phragmition

Таблиця 1

Частка фітоценотичного різноманіття в класах рослинних угруповань прибережно-водної та болотної рослинності на території гірничих виробітків Центрального Полісся

Класи рослинності	**Частка фітоценотичного різноманіття (в процентах)**	**Кількість синтаксонів**		
		Порядків	**Союзів**	**асоціацій**
Phragmiti-Magnocaricetea	88	3	7	22
Scheuchzerio palustris-Caricetea fuscae	8	2	2	2
Isoëto-Nanojuncetea	4	1	1	1

Таблиця 2

Кількість кар'єрів в яких зустрічаються асоціації рослинних угруповань прибережно-водної та болотної рослинності та їхня частка від загально числа описаних локалітетів

Клас рослинності	**Асоціація рослинності**	**Кількість кар'єрів у яких зустрічається асоціація**	**Частка від загально числа описаних локалітетів (в процентах)**
Phragmiti-Magnocaricetea	Phragmitetum australis	26	16,8
	Typhetum angustifoliae	21	13,5
	Typhetum latifoliae	15	9,7
	Glycerietum fluitantis	13	8,4
	Glycerietum maximae	9	5,8
	Alopecuro-Alismatetum plantaginis-aquaticae	8	5,2
	Caricetum elatae	7	4,5
	Caricetum acutiformis	5	3,2
	Caricetum gracilis	5	3,2
	Carici acutae-Glycerietum maximae	5	3,2
	Carici elatae-Calamagrostietum canescentis	5	3,2
	Eleocharitetum palustris	4	2,6
	Iridetum pseudocaori	4	2,6
	Caricetum vesicariae	4	2,6
	Glycerio fluitantis-Oenanthetum aquaticae	3	1,9
	Sagitario-Sparganietum emersi	3	1,9
	Butomo-Sagittarietum sagittifoliae	2	1,3
	Equisetetum fluviatilis	2	1,3
	Oenanthetum aquaticae	1	0,6
	Phalaroidetum arundinaceae	1	0,6
	Sparganietum emersi	1	0,6
	Schoenoplectetum lacustris	1	0,6
	Cicuto virosae-Caricetum pseudocyperi	1	0,6
Scheuchzerio palustris-Caricetea fuscae	Caricetum nigrae	2	1,3
	Polytricho communis-Molinietum caeruleae	1	0,6
Isoëto-Nanojuncetea	Juncetum bufonii	6	3,9

порядку Phragmitetalia. Винятком є асоціація Glycerietum fluitantis, що належить до союзу Glycerio-Sparganion fluitans порядку Nasturcio-Glicerietalia. Вона часто зустрічається тонкими стрічками на мілководдях водойм утворених в результаті гірничої діяльності. Таку картину ми спостерігаємо в третині обстежених гірничих об'єктів.

Незалежно від типу гірської породи, що видобувається, прибережно-водна та болотна рослинність кар'єрів Центрального Полісся має кілька характерних рис (Хом'як, 2022). В більшості випадків тут не зустрічаються описи, які можна віднести до номенклатурного типу. Це частіше за все екотони із вологими луками або прирусловими чагарниками.

Угруповання маловидові та монодомінантні, але із нижчими ніж в природних ценозах показниками проективного покриття. В багатьох випадках ми спостерігаємо декілька особин діагностичних видів, фітополя яких практично не перекриваються. Також, площі, які займає прибережно-водна та болотна рослинність кар'єрів, є незначними. В рідких випадках окремі локалітет перевищують 4м^2 (Khomiak et al., 2023).

Розглянемо приклад із родовищами каолінів, розташованими на південному заході Центрального Полісся. Це Західно-Глинянська ділянка Дубрівського родовища первинних каолінів та Новаківська ділянка Майдан-Вільського родовища. Ці родовища розташовані по сусідству і по суті є частиною єдиного масиву залягання каолінів. У районі села Глиняне (Дубрівське родовище) описано 7 асоціацій (26% фітоценотичного різноманіття). Прибережно-водні оселища зустрічаються вздовж узбережжя ставка та меліоративної канави, а також в заглибинах із водонепроникним горизонтом на дні. Це шувари порядку Phragmitetalia, занурені у воду зарості ситняга болотного та осокове високотрав'я. Перша група сформована очеретом південним (асоціація Phragmitetum australis) та рогозом вузьколистим (асоціація Typhetum angustifoliae) і широколистим (асоціація Typhetum latifoliae). На мілководних ділянках вздовж берега зустрічаються оселища із рослинністю асоціації Eleocharitetum palustris. Вони спостерігаються на глибині від 0 до 25 см. Площі цих оселищ коливаються від 1 до 3 м^2. Осокові оселища представлені маловидовими угрупованнями кількох видів. Їх складають асоціації Caricetum elatae, Caricetum gracilis та Carici acutae-Glycerietum maximae

В районі села Новаки (Майдан-Вільського родовища) описано 12 асоціацій (46% від загального фітоценотичного різноманіття). Тут прибережно-водні та болотні оселища здебільшого пов'язані із заболоченим вільховим рідколіссям. В окремих місцях в трав'яному покриві таких оселищ зустрічаються рослинні угруповання, які можна класифікувати як рослинність класу Phragmiti-Magnocaricetea. Це велика кількість асоціацій порядків Nasturcio-Glicerietalia та Magnocaricetalia. Вони є екотонними ценозамии між класами Phragmiti-Magnocaricetea і Alnetea glutinosae.

Рослинність порядку Phragmitetalia можуть утворювати самостійні ценози на мілководді та прибережній зоні не затінених водойм. Це монодомінантні угруповання сформовані рогозом вузьколистим (Typha angustifolia L.), які належать до асоціації Typhetum angustifoliae; асоціації Typhetum latifoliae із рогозом широколистим (Typha latifolia L.); асоціації Phragmitetum australis із очеретом південним (Phragmites australis) та асоціації Glycerietum maximae із лепешняком великим (Glyceria maxima (C. Hartm.) Holmb.).

У невеликих канавах або в колії від проходження тяжкої техніки часто зустрічаються оселища сформовані асоціацією рослинних угруповань Alopecuro-Alismatetum plantaginis-aquaticae. Вони утворюються великим числом прибережно-водних, лучних та синантропних видів за домінування частухи подорожникової (Alisma plantago-aquatica). Вздовж берегів канави дуже тонкими смужками зустрічаються угруповання сформовані лепешняком плаваючим (Glyceria fluitans). Вони належать до асоціації Glycerietum fluitantis. Рослинність порядку Magnocaricetalia зосереджена в заболочених лісах. Угруповання евтрофних та мезо-евтрофної рослинності часто не утворюють самосійних оселищ, а є частинами екосистем заболоченого рідколісся із застоєм води.

Оскільки, в кар'єрах, які видобувають пісок або кристалічні породи (граніт, лабродарит, габро та кварцит) фітоценотичне різноманіття в середньому рівне 17, створюється враження, що саме каоліни вплинули на його підвищення. Однак, ми маємо Березівське родовище гранітів із ще вищою кількістю описаних асоціацій (14 асоціацій або 54% від загального фітоценотичного різноманіття) та Норинське родовище гранітів (13 асоціацій або 50% від загального фітоценотичного різноманіття). Ключовим фактором, який впливає на фітоценотичне різноманіття кар'єрів є наявність в безпосередній близькості великого числа природних боліт.

Висновки

Під час дослідження нами було виявлено прибережно-водну та болотну рослинність на 29 кар'єрах із 37 обстежених, що становить 78%. Такі високі показники вказують на сприятливі умови для формування цього типу рослинності піч час добування корисних копалин відкритим способом на території Центрального Полісся.

Прибережно-водна та болотна рослинність на території гірничих виробітків Центрального Полісся належить до 3 класів,

7 порядків, 10 союзів, 26 асоціацій, визначених за системою Браун Бланке.

Найвищий рівень фітоценотичного різноманіття характерний для класів рослинних угруповань Phragmiti-Magnocaricetea (88%), Scheuchzerio palustris-Caricetea fuscae (8%) та Isoëto-Nanojuncetea (4%).

На рівні асоціацій найчастіше зустрічаються ті, які належать до класу Phragmiti-Magnocaricetea. Так асоціацію Phragmitetum australis спостерігаємо в 16,8% локалітетів; Typhetum angustifoliae – 13,5%; Typhetum latifoliae – 9,7%; Glycerietum fluitantis – 8,4%.

Ключовим фактором який впливає на фітоценотичне різноманіття кар'єрів є наявність в безпосередній близькості великого числа природних боліт.

Прибережно-водна та болотна рослинність на території кар'єрів Центрального Полісся здебільшого носить екотонний характер, є маловидовим із низьким проективним покриттям діагностичних видів та із невеликими площами суцільних масивів. В більшості випадків тут не зустрічаються описи, які можна віднести до номенклатурного типу.

Список використаної літератури

Дубина Д.В. Продромус рослинності України. Київ : Наукова думка, 2019. 784 с.

Коніщук В.В. Концепція збалансованого розвитку боліт і торфовищ України. *Агроекологічний журнал.* 2010. № 4. С. 18–23.

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., 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. https://doi.org 10.32846/2306-9716/2020. eco.5-32.19.

Хом'як І.В. Синтаксономія відновлюваної рослинності кар'єрів Центрального Полісся. *Український ботанічний журнал.* 2022. № 79 (3). С. 142–153. https://doi.org/10.15407/ ukrbotj79.03.142.

Якубенко Б.Є. , Попович С.Ю. , Устименко П.М., Дубина Д.В., Чурілов А.М. Геоботаніка: методичні аспекти досліджень. Ліра, 2020, 316 с.

Helgeson T. A Reconnaissance-Level Quantitative Comparison of Reclaimed Water, Surface Water, and Groundwater. Alexandria, VA: WateReuse Research Foundation. 2009. 141 p.

Hennekens S. Turboveg for Windows. 1998–2007. Version 2. Wageningen: *Inst. voor Bos en Natuur*, 2009. 84 p.

Khomiak I.V., Bren A.L., Medvid O.V., Khomiak A.K., Maksymenko I.Yu. Dynamics of terrestrial vegetation on the territory of quarries as a model of post-military restoration of wild nature. *Ukrainian Journal of Natural Sciences.* 2023. № 5. P. 61–69. https://doi.org/10.32782/ naturaljournal.5.2023.7.

Mosyakin S.L., Fedoronchuk M.M. Vascular Plants of Ukraine: a Nomenclatural checklist. Kiev, National Academy of Sciences of Ukraine M. G. Kholodny Institute of Botany, 1999. 345 p.

Shumygai I.V., Mudrak O.V., Konishchuk V.V., Mudrak H.V., Khrystetska M.V. Ecological monitoring of water bodies in Central Polissya (Ukraine). *Ukrainian Journal of Ecology.* 2021. № 11 (2). P. 434–440.

Voulvoulis N. Water reuse from a circular economy perspective and potential risks from an unregulated approach. *Current Opinion in Environmental Science & Health.* 2018. Vol. 2. P. 32–45.

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

Dubyna, D.V. (2019). Prodromus roslynnosti Ukrajiny [Prodromus vegetation of Ukraine]. Kyiv : *Naukova dumka* [in Ukrainian].

Konishchuk, V.V. (2010). Kontseptsiia zbalansovanoho rozvytku bolit i torfovyshch Ukrainy [The concept of balanced development of swamps and peatlands of Ukraine]. *Ahroekolohichnyy zhurnal* [*Agroecological journal]*, 4, 18–23 [in Ukrainian].

Tymchenko, A.Ju., & Khomiak, I.V. (2019). Avtoghenni sukcesiji v ekosystemakh ghirnychykh vyrobok v dolyni richky Ghujva [Autogenic successions in ecosystems of mine workings in the valley of the Guiva River] *Zb. nauk. pracj Biologhichni doslidzhennja* [*Biological research – 2019: collection of scientific works]*, Zhytomyr : Polissja, pp. 353–354 [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]. *Ekolohichni nauky [Ecological sciences]*, 5 (32), 1, 136–141. https://doi.org 10.32846/2306-9716/2020.eco.5-32.19 [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 journal]*, 79 (3), 142–153. https://doi.org/10.15407/ukrbotj79.03.142 [in Ukrainian].

Yakubenko, B.Ie., Popovych, S.Iu., Ustymenko, P.M., Dubyna, D.V., & Churilov, A.M. (2020). Heobotanika: metodychni aspekty doslidzhen [Geobotany: methodological aspects of research]. Lira [in Ukrainian].

Helgeson, T. (2009). A Reconnaissance-Level Quantitative Comparison of Reclaimed Water, Surface Water, and Groundwater. Alexandria, VA: WateReuse Research Foundation [in English].

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

Khomiak, I.V., Bren, A.L., Medvid, O.V., Khomiak, A.K., & Maksymenko, I.Yu. (2023). Dynamics of terrestrial vegetation on the territory of quarries as a model of post-military restoration of wild nature. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*, 5, 61–69. https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.7 [in English].

Mosyakin, S.L., & Fedoronchuk, M.M. (1999). Vascular Plants of Ukraine: a Nomenclatural checklist. Kiev, National Academy of Sciences of Ukraine M. G. Kholodny Institute of Botany [in English].

Shumygai, I.V., Mudrak, O.V., Konishchuk, V.V., Mudrak, H.V. & Khrystetska, M.V. (2021). Ecological monitoring of water bodies in Central Polissya (Ukraine). *Ukrainian Journal of Ecology*, 11 (2), 434–440 [in English].

Voulvoulis, N. (2018). Water reuse from a circular economy perspective and potential risks from an unregulated approach. *Current Opinion in Environmental Science & Health,* 2, 32–45 [in English].

Westhoff, V., & Maarel, E. van der. (1973). The Braun-Blanquet approach. *Handbook of Vegetation Science*. Part V: *Ordination and Classification of Vegetation*. Ed. By R.H. Whittaker. The Hague [in English].

Отримано: 04.11.2024
Прийнято: 18.11.2024

ЗМІСТ

БІОЛОГІЯ

Н. Я. Левчик, Н. В. Заіменко, Н. Є. Горбенко, Г. І. Скрипка

Традиції, можливості та перспективи застосування рослин родини Молочайні (*Euphorbiaceae* Juss.) у промисловості, медицині, побуті та у виробництві продуктів харчування.....7

Ю. С. Шелюк, Д. С. Махнєвич, О. С. Солонько

Фітопланктон малої річки як показник якості вод в умовах змін клімату та воєнних дій на території України.....31

ГЕОГРАФІЯ

Р. П. Власенко, Я. П. Квацало, В. С. Костюк, В. В. Цимбалюк

Сучасний антропогенний вплив на навколишнє середовище Житомирської області.....40

ХІМІЯ

I. V. Korotkova, T. P. Romashko

Application of quantum-chemical methods to estimate the carcinogenic properties of benzopyrene metabolites.....54

Р. О. Денисюк, В. М. Томашик, М. В. Чайка, О. М. Камінський, С. В. Писаренко, М. М. Вовченко

Хімічне травлення монокристалів $Mn_xCd_{1-x}Te$ розчинами HNO_3 – KI – диметилформамід.....64

О. М. Камінський, Р. О. Денисюк, М. В. Чайка, С. В. Писаренко, Д. Ю. Панасюк, С. В. Авдєєв, О. С. Євдоченко

Сорбційне вилучення іонних форм Купруму(II) з водних розчинів магніточутливим нанокомпозитом з гідроксиапатитною поверхнею.....75

Г. В. Мартинюк, О. І. Аксіментьєва

Вплив мінерального наповнювача силіцій(IV) оксиду, модифікованого неорганічними сполуками на електричні властивості їх композитів з поліаніліном.....85

Р. П. Мигущенко, М. М. Волобуєв, І. В. Асєєва, О. Ю. Кропачек, В. М. Балєв

Аналіз вмісту білків в різних видах молока шляхом титрування.....93

С. А. Неділько, О. В. Іванов

Синтез і дослідження алюміній-заміщених шпінелей на основі $ZnMn_2O_4$: структура, властивості та перспективи застосування.....102

АГРОНОМІЯ

В. С. Закорко, В. М. Коваленко

Способи культивування насіннєвого матеріалу картоплі, отриманого в культурі меристем *in vitro*.....114

У. М. Карбівська, Д. І. Шеленко, В. В. Чумбей, О. Д. Турак

Продуктивність ранньостиглих сортів лохини в умовах Прикарпаття.....121

Я. Ю. Марценюк, Н. А. Захарчук, О. А. Зінченко

Економічна та енергетична складові вирощування сортів картоплі за використання регуляторів росту рослин та різних строків садіння.....127

С. В. Поспєлов, В. М. Самородов, В. В. Оніпко, Є. О. Зезекало

Біологічна активність ґрунту та продуктивність ехінацеї при її повторному вирощуванні.....139

А. М. Рибальченко, Л. М. Криворучко

Мікроклональне розмноження в культурі *in vitro*: можливості та переваги використання 150

І. І. Рожко, М. І. Кулик, А. П. Ракшеєв

Вплив заходів післязбиральної доробки та передпосівної підготовки насіння на посівні якості та врожайність квасолі овочевої 158

Я. С. Фанін, М. А. Литвиненко, О. О. Молодченкова, І. А. Міщенко, І. І. Моцний, А. А. Дуніч, Л. Т. Міщенко

Селекційні аспекти використання гена GPC-B1 в потрійних схрещуваннях та залучення генів від *Aegilops tauschii* в складних схрещуваннях із місцевими сортами.....172

Я. Г. Цицюра

Ґрунтореабілітаційний потенціал редьки олійної за її сидерального використання з позиції відновлення базових агрофізичних властивостей.....185

Ю. М. Шкатула, А. О. Рац

Оцінка впливу хімічних заходів на забур'яненість і урожайність пшениці озимої.....197

ЕКОЛОГІЯ

Ю. О. Бондар, О. А. Марченко, І. А. Діденко, С. О. Пустова

Природно-заповідний фонд Київщини як складова національної системи екологічної мережі 206

Р. А. Валерко, Л. О. Герасимчук, Л. Д. Романчук

Сільські селітебні території як об'єкт наукових досліджень: огляд літератури.....215

Д. В. Лукашов, Т. С. Тесьолкіна

Біогеохімічний цикл плюмбуму в умовах екосистем грабових дібров Середнього Придніпров'я.....222

О. В. Мудрак, В. В. Клочанюк

Екологічна оцінка поверхневих вод басейну річки Згар.....237

К. А. Нестерова, Н. Ю. Терещенко

Визначення залишкового вмісту ксенобіотиків водних об'єктів Київської області.....246

Л. Д. Романчук, Л. О. Герасимчук, Р. А. Валерко

Використання сірої води зеленими дахами: системний аналіз та перспективи впровадження.....254

А. С. Серкіз

Урбоекосистема Тернополя в умовах транспортного навантаження.....264

І. В. Хом'як, В. В. Коніщук

Прибережно-водна та болотна рослинність гірничих об'єктів Центрального Полісся.....276

НОТАТКИ