

Міністерство освіти і науки України
Житомирський державний університет імені Івана Франка

Український журнал природничих наук

№ 12

Науковий журнал,
заснований у 2022 році



Видавничий дім
«Гельветика»
2025

*Видається за рішенням вченої ради Житомирського державного університету імені Івана Франка
(протокол № 13 від 27.06.2025 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 Караденізського технічного університету (Трабзон, Турецька Республіка)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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)

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

Стунженас Вірматас – 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: 2025. № 12. 390 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: Е1 Біологія та біохімія, Е2 Екологія, Е3 Хімія, Е4 Науки про Землю,
С6 Географія та регіональні студії, Н1 Агрономія

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

В усіх статтях збережено орфографію та пунктуацію авторів.

Підписано до друку 30.06.2025 р. Формат 60х90/8. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 48,75. Тираж 300. Замовлення 0725/551

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, 2025

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

Ukrainian Journal of Natural Sciences

№ 12

Scientific journal,
founded in 2022



Publishing House
"Helvetica"
2025

Editor-in-chief

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

Co-editor-in-chief

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

Executive Secretary

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

Members of the Editorial Board

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Kryvenko Anna – Doctor of Sciences (Agricultural), Professor, Head of the Department of Plant Protection, Genetics and Breeding, Odessa State Agrarian University (Odessa, 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 (Odessa, 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 Iliia – PhD (Aquatic Biology/Limnology), Professor, Senior Scientist of Israel Oceanographic and Limnological Research, Yigal Allon Kinneret Limnological Laboratory (Haifa, Israel)

Piliarska Olena – PhD (Agricultural), Senior Researcher, Head of the Department of Marketing and International Activities, Institute of Climate-Smart Agriculture, National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine (Odessa, 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 Lashkariyov 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)

Chekhnii 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: 2025. № 12. 390 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: E1 Biology and Biochemistry, E2 Ecology, E3 Chemistry, E4 Earth Sciences,
C6 Geography and Regional Studies, H1 Agriculture

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

Authors' spelling and punctuation are preserved in the articles.

Signed for printing 30.06.2025. Size 60x90/8. Offset Paper. Font Times New Roman
Risograph printing. Conventional printed sheets 48,75. Number of copies 300. Order 0725/551

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, 2025



Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 12
Український журнал природничих наук
№ 12

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

БІОЛОГІЯ

УДК 678.048:676.034

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.1>

ДОСЛІДЖЕННЯ АКТИВНОСТІ АНТИОКСИДАНТНИХ ЕНЗИМІВ ДЕЯКИХ ВИДІВ ЛІКАРСЬКИХ РОСЛИН ПЕРЕДКАРПАТТЯ

Н. К. Гойванович¹, С. С. Монастирська², С. Я. Волошанська³, Я. В. Лесик⁴

Дисбаланс між прооксидантами й антиоксидантами в організмі під впливом чинників зовнішнього середовища та внутрішніх стресів зумовлює розвиток оксидативного стресу – процесу, що лежить в основі багатьох патологічних станів. Одним із перспективних шляхів мінімізації наслідків оксидативного стресу є використання природних антиоксидантів, зокрема препаратів на основі лікарських рослин. Дослідження антиоксидантної активності рослинної сировини має велике значення для медицини, фармакології та екології, оскільки дозволяє розкрити потенціал біологічно активних речовин для профілактики і лікування захворювань.

Мета роботи – дослідити активність ключових антиоксидантних ензимів – каталази та пероксидази – у рослинній сировині 15 видів лікарських рослин флори Передкарпаття. Зразки рослин були зібрані на екологічно чистих територіях околиць міста Борислава в період 2020–2024 років. Ензимну активність визначали спектрофотометричними методами.

Результати дослідження показали суттєві відмінності в активності антиоксидантних ензимів між різними видами рослин. Найвищу пероксидазну активність зафіксовано в цикорію звичайного

¹ кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри біології та хімії
(Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, м. Дрогобич)
e-mail: natahoyvan@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3442-0674

² кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри біології та хімії
(Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, м. Дрогобич)
e-mail: svitlana.monastyrskaya@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8529-800X

³ кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри біології та хімії
(Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, м. Дрогобич)
e-mail: svitlana.voloshanska@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4589-6376

⁴ доктор ветеринарних наук, професор,
професор кафедри біології та хімії
(Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, м. Дрогобич)
e-mail: Lesykyv@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7845-7006

(*Cichorium intybus* L.) та лопуха великого (*Arctium lappa* L.), тоді як найвища каталазна активність спостерігалася в пижма звичайного (*Tanacetum vulgare* L.) та деревію звичайного (*Achillea millefolium* L.). Для багатьох досліджуваних рослин характерна висока активність обох ензимів, що свідчить про скоординовану роботу антиоксидантної системи. Отримані результати підкреслюють важливість подальших досліджень біохімічних механізмів антиоксидантного захисту для розроблення ефективних фітопрепаратів і підвищення стійкості рослин до стресових чинників.

Ключові слова: антиоксидантна система, оксидативний стрес, каталаза, пероксидаза, лікарські рослини, Передкарпаття.

STUDY OF ANTIOXIDANT ENZYME ACTIVITY IN SOME MEDICINAL PLANTS OF PRECARPATHIA

N. K. Hoivanovych, S. S. Monastyrskaya, S. Ya. Voloshanska, Ya. V. Lesyk

The imbalance between prooxidants and antioxidants in the body under the influence of environmental and internal stress factors provokes the development of oxidative stress – a process that underlies many pathological conditions. One of the promising ways to minimize the consequences of oxidative stress is the use of natural antioxidants, especially preparations based on medicinal plants. Researching the antioxidant activity of plant raw materials is important for medicine, pharmacology, and ecology, as it allows for the assessment of the potential of biologically active substances for the prevention and treatment of diseases.

The aim of this work was to study the activity of key antioxidant enzymes – catalase and peroxidase – in plant raw materials of 15 species of medicinal plants of the Precarpathian flora. Plant samples were collected in ecologically clean areas near the town of Boryslav during the period 2020–2024. The determination of enzyme activity was carried out by spectrophotometric methods.

*The results of the study showed significant differences in the antioxidant activity of enzymes in different plant species. The highest peroxidase activity was recorded in common chicory (*Cichorium intybus* L.) and burdock (*Arctium lappa* L.), while the highest catalase activity was observed in tansy (*Tanacetum vulgare* L.) and common yarrow (*Achillea millefolium* L.). Many of the studied plants are characterized by high activity of both enzymes, which indicates the coordinated work of the antioxidant system.*

The obtained results emphasize the importance of further research into the biochemical mechanisms of antioxidant defense for the development of effective phytopreparations and increasing the resistance of plants to stress factors.

Key words: antioxidant system, oxidative stress, catalase, peroxidase, medicinal plants, Precarpathia.

Вступ

Порушення природного балансу між прооксидантами й антиоксидантами в організмі, спричинене негативним впливом факторів зовнішнього середовища, психоемоційним напруженням і генетичною схильністю, призводить до надмірного утворення вільних радикалів (Cheng & Yuan, 2009; Mishra et al., 2023). Ці високореакційні сполуки ініціюють каскад деструктивних реакцій, пошкоджують клітинні структури та порушують їхні функції. Наслідком цього є розвиток оксидативного стресу, що є основою багатьох фізіологічних і патофізіологічних процесів, зокрема й запалення, реперфузійного ураження тканин, бронхолегеневих захворювань, старіння та канцерогенезу (Rajput et al., 2021).

Беручи до уваги значну роль оксидативного стресу в патогенезі різноманітних захворювань, пошук ефективних шляхів

його мінімізації є надзвичайно актуальним завданням сучасної медицини та фармакології. Одним із перспективних підходів є системне вживання харчових продуктів, збагачених природними антиоксидантами. Окрім того, зростає інтерес до використання рослинних препаратів, які проявляють широкий спектр фармакологічної активності, зокрема й антиоксидантну, протипухлинну, гепатопротекторну, протівірусну та бактерицидну дію (Kumar et al., 2012; Voronkova & Vysochina, 2014).

Вивчення активності антиоксидантних ензимів в екстрактах лікарських рослин є поширеним підходом для оцінювання їхнього антиоксидантного потенціалу та розуміння механізмів їхньої дії або відповіді на стресові умови. Дослідження, проведені на флорі України та споріднених видах, надають деяку інформацію, хоча дані щодо рослин безпосередньо з Передкарпаття

є обмеженими. Аналіз наукових джерел свідчить про наявність досліджень стану антиоксидантної системи (зокрема й ензимної ланки) лише для окремих видів лікарських рослин Передкарпаття: *Juniperus communis* (ялівець звичайний), *Calendula officinalis* (нагідки лікарські), *Origanum vulgare* (материнка звичайна), *Daucus carota* (морква дика), *Humulus lupulus* (хміль звичайний), *Vaccinium myrtillus* (чорниця), *Levisticum officinale* (любисток лікарський) (Гойванович, 2014; Павлюк та ін., 2015; Pavlyuk et al., 2015; Монастирська та ін., 2016; Середюк та ін., 2016).

Активність антиоксидантних ензимів у рослинах не є сталою величиною. Вона залежить від генетичних особливостей (різні сорти/культівари можуть мати різну активність), умов навколишнього середовища (абіотичні стреси, як-от засолення, посуха, температура, важкі метали, можуть індукувати або пригнічувати активність ензимів), ґрунтово-кліматичні умови впливають на склад БАР (Suzuki et al., 2012; Rasool et al., 2013). Аналіз доступних джерел виявляє фрагментарні дані щодо дослідження антиоксидантних властивостей лікарських рослин флори Передкарпаття. Відсутні систематичні дослідження профілів активності ключових антиоксидантних ензимів для широкого кола ендемічних або традиційно важливих рослин Передкарпатського регіону.

Мета роботи – дослідити активність ключових антиоксидантних ензимів – каталази та пероксидази – у рослинній сировині 15 видів лікарських рослин флори Передкарпаття.

Матеріал і методи

Об'єктами дослідження активності антиоксидантних ензимів були рослини, що поширені в районі Передкарпаття. Для зручності проведення дослідів більшість рослин зібрали в межах міста Борислава, а саме на околицях гори Буковиця (Східні Бескиди, неподалік бальнеологічних курортів Трускавця і Східниці). Територія досліджень і відбору зразків екологічно чиста, що впливає на якість рослинного матеріалу і зручність його транспортування.

Серед великої кількості рослин, що поширені на Передкарпатті, вибрали 15 дикорослих рослин для дослідження активності ключових антиоксидантних ензимів, як-от: гірчак перцевий (*Polygonum hydropiper* L.), лобода біла (*Chenopodium album* L.), лопух великий (*Arctium lappa* L.), подорожник

великий (*Plantago major* L.), розрив-трава звичайна (*Impatiens noli-tangere* L.), ряска мала (*Lemna minor* L.), цикорій звичайний (*Cichorium intybus* L.), чистець болотний (*Stachys palustris* L.), перстач прямостоячий (*Potentilla erecta* L.), пижмо звичайне (*Tanacetum vulgare* L.), деревій звичайний (*Achillea millefolium* L.), грицики звичайні (*Capsella bursa-pastoris* L.), верес звичайний (*Calluna vulgaris* (L.) Hill.), звіробій звичайний (*Hypericum perforatum* L.), гірчак зміїний (*Persicaria bistorta* L.) (табл. 1).

Для встановлення виду кожної рослини користувались визначником лікарських рослин (Сафонов, 2010). Рослини для аналізу збирали в період цвітіння – 2020–2024 рр. Відбирали по декілька особин кожного виду однієї вікової групи в задовільному санітарному стані відповідно до методик. Відібрані зразки розфасовували в поліетиленові пакети, підписували та поміщали в морозильну камеру для зберігання. Ряску збирали з різних водоймищ і поміщали для зберігання у спеціальні акваріуми.

Принцип визначення активності пероксидази ґрунтується на реакції окиснення бензидину під дією ензиму, що є в рослинах ще до утворення продукту окиснення синього кольору визначеної концентрації, що була встановлена за допомогою спектрофотометра (Шупранова та ін., 2011). Вимірювання проводили за довжини хвилі $\lambda = 625$. За дії пероксидази відбувається реакція окиснення бензидину з утворенням сполуки синього кольору. За низької активності ензиму яскраве синє забарвлення утворюватися не буде. Під час вимірювання використовували секундомір, щоб визначити час, за який екстинція нормалізувалася.

Визначення активності каталази ґрунтується на визначенні кількості розщепленого пероксиду водню. Для визначення активності каталази ензим екстрагували 0,9%-вим розчином хлориду натрію у співвідношенні 1:10. Отриманий рослинний екстракт центрифугували впродовж 15 хвилин за 3 000 g. Активність ензиму визначали в надосадовій рідині спектрофотометрично за довжини хвилі 410 нм. Ензимну активність виражали в мкмоль за 1 хвилину, перераховуючи дані на 1 мг білка (Шупранова та ін., 2011). Вимірювання активності ензимів проводили на спектрофотометрі "Unico 2150".

Результати та їх обговорення

Антиоксидантна система рослин є складним багаторівневим механізмом, спрямова-

Таблиця 1

Антиоксидантні властивості досліджуваних лікарських рослин

№	Лікарська рослина	Дослідження антиоксидантних властивостей
1	Гірчак перцевий (<i>Polygonum hydropiper</i>)	Містить біологічно активні речовини (флавоноїди, аскорбінову кислоту, каротин) і має високу антиоксидантну активність. Дані про активність антиоксидантних ензимів фрагментарні.
2	Лобода біла (<i>Chenopodium album</i>)	Деякі види лободи досліджувалися на вміст антиоксидантних сполук (виявлені флавоноїди, аскорбінова кислота, каротин), але дані про ензимну активність є фрагментарними.
3	Лопух великий (<i>Arctium lappa</i>)	Містить поліфеноли, які можуть мати антиоксидантні властивості. Також містить у великій кількості аскорбінову кислоту.
4	Подорожник великий (<i>Plantago major</i>)	Відомий своїми протизапальними та ранозагоювальними властивостями, які частково можуть бути пов'язані з антиоксидантною активністю. Відомо про вміст флавоноїдів, аскорбінової кислоти, каротину.
5	Розрив-трава звичайна (<i>Impatiens noli-tangere</i>)	Інформація про антиоксидантні ензими є фрагментарною, але рослини роду <i>Impatiens</i> можуть містити біологічно активні сполуки (флавоноїди).
6	Ряска мала (<i>Lemna minor</i>)	Досліджується як потенційне джерело білка й інших антиоксидантів (аскорбінова кислота, флавоноїди), але дані про її антиоксидантні ензими є фрагментарними.
7	Цикорій звичайний (<i>Cichorium intybus</i>)	Містить інулін та інші біологічно активні сполуки (аскорбінова кислота, каротини), які можуть мати антиоксидантні властивості.
8	Чистець болотний (<i>Stachys palustris</i>)	Деякі види чистецю відомі своїми лікарськими властивостями, високий вміст аскорбінової кислоти, але інформації про активність антиоксидантних ензимів не знайдено.
9	Гірчак зміїний (<i>Persicaria bistorta</i>)	Містить фенольні сполуки, каротиноїди й аскорбінову кислоту, що зумовлює високу антиоксидантну активність. Але більшість досліджень зосереджувалися на вивченні кореневищ. Даних про інші частини рослини майже відсутні.
10	Верес звичайний (<i>Calluna vulgaris</i>)	Містить фенольні сполуки, які можуть мати антиоксидантні властивості.
11	Деревій звичайний (<i>Achillea millefolium</i>)	Містить флавоноїди й інші сполуки з антиоксидантним потенціалом.
12	Перстач прямостоячий (<i>Potentilla erecta</i>)	Містить флавоноїди та таніни, які можуть проявляти антиоксидантну активність.
13	Пижмо звичайне (<i>Tanacetum vulgare</i>)	Відоме своїми інсектицидними та протизапальними властивостями, але дані про активність антиоксидантних ензимів є фрагментарними.
14	Звіробій звичайний (<i>Hypericum perforatum</i>)	Відомий своїми антидепресантними та протизапальними властивостями, які частково можуть бути пов'язані з антиоксидантною активністю.
15	Грицики звичайні (<i>Capsella bursa-pastoris</i>)	Досліджувалися на вміст різних біологічно активних речовин, але дані про конкретні антиоксидантні ензими є обмеженими.

ним на захист організму від оксидативного стресу, що є наслідком дії активних форм кисню (далі – АФК). Ці високореакційні молекули утворюються у процесі нормального метаболізму, особливо під час фотосинтезу та дихання, а також у відповідь на різноманітні абіотичні та біотичні стреси, як-от ультрафіолетове випромінювання, високі та низькі температури, посуха, засолення, забруднення важкими металами (Kumar et al., 2012). Надмірне накопичення АФК може призвести до пошкодження клітин-

них компонентів, включаючи ліпіди мембран, білки та нуклеїнові кислоти, що порушує нормальне функціонування рослинного організму.

Для ефективного протистояння оксидативному стресу у процесі еволюції в рослин утворилась комплексна система антиоксидантного захисту, яка містить неензимні й ензимні компоненти (Zhong-Guang & Ming, 2011). До неензимних антиоксидантів належать різноманітні низькомолекулярні сполуки, як-от аскорбінова кислота

(вітамін С), токоферолі (вітамін Е), каротиноїди (наприклад, β -каротин, лютеїн), глутатіон, фенольні сполуки (флавоноїди, антоціани, лігнани) та інші вторинні метаболіти (Данилова, 2003). Ці сполуки здатні безпосередньо нейтралізувати АФК шляхом віддачі електрона або протона, перериваючи ланцюгові реакції окиснення та запобігаючи подальшому пошкодженню клітинних структур.

Ензимна ланка антиоксидантного захисту представлена різноманітними ензимами, які каталізують реакції детоксикації АФК. Серед найважливіших ензимів варто відзначити каталазу та пероксидазу, що знешкоджують пероксид водню перетворенням його на воду та молекулярний кисень або використовують інші субстрати для його відновлення (Колупаєв і Обозний, 2013). За нормальних фізіологічних умов концентрації наявної в організмі каталази досить, щоб запобігти токсичній дії пероксиду водню. Однак низка чинників, зокрема нестача кисню, спричинює зниження активності каталази. У табл. 2 представлено результати визначення активності каталази та пероксидази в рослинній сировині досліджуваних рослин.

Пероксидаза – ензим, що каталізує окиснення поліфенолів і деяких ароматичних амінів за допомогою кисню, пероксиду водню або органічних пероксидів (Jaspers & Kangasjarvi, 2010).

Встановлено, що пероксидазна активність досліджуваних об'єктів коливається в межах $2,79 \cdot 10^{-5}$ – $26,65 \cdot 10^{-5}$ мкмоль/г. Серед досліджуваних об'єктів найвища пероксидазна активність спостерігається в рослинній сировині *Cichorium intybus* – становить $26,65 \cdot 10^{-5} \pm 6,356$ мкмоль/г, і *Arctium lappa* – $21,50 \cdot 10^{-5} \pm 1,33$ мкмоль/г. Низька активність пероксидази встановлена в рослинній сировині *Achillea millefolium* – $2,79 \cdot 10^{-5} \pm 0,58$ мкмоль/г, *Polygonum hydropiper* – $3,0 \cdot 10^{-5} \pm 0,53$ мкмоль/г, *Lemna minor* – $3,31 \cdot 10^{-5} \pm 0,68$ мкмоль/г, *Persicaria bistorta* – $3,68 \cdot 10^{-5} \pm 0,81$ мкмоль/г.

Візуальна оцінка пероксидазної активності представлена на рис. 1. Як видно з нього, у *Cichorium intybus* і *Arctium lappa* пероксидазна активність у декілька разів перевищує показник активності цього ж ензиму серед більшості досліджуваних рослин, адже пероксидазна активність у решти рослин коливається майже на одному рівні – $5,41 \cdot 10^{-5}$ – $8,32 \cdot 10^{-5}$ мкмоль/г. Імовірно, для більшості досліджуваних рослин ключовим ензимом антиоксидантного захисту є каталаза.

Каталаза – ензим, що визначає в рослині здатність знешкоджувати пероксид водню і окиснювати низькомолекулярні спирти та нітрити за його наявності. Таким чином каталаза бере участь у процесі клітинного дихання (Jaspers & Kangasjarvi, 2010).

Таблиця 2
Активність антиоксидантних ензимів у досліджуваній рослинній сировині лікарських рослин

№	Назва рослини	Пероксидаза, $A \cdot 10^{-5}$, мкмоль/г ($M \pm m$)	Каталаза, мкмоль/л ($M \pm m$)
1	<i>Polygonum hydropiper</i>	$3,0 \pm 0,53$	$2197,2 \pm 177,6$
2	<i>Chenopodium album</i>	$7,67 \pm 1,11$	$828,8 \pm 72,66$
3	<i>Arctium lappa</i>	$21,50 \pm 1,33$	$1795,8 \pm 68,26$
4	<i>Plantago major</i>	$7,0 \pm 0,67$	$4\,762,2 \pm 132,66$
5	<i>Impatiens noli-tangere</i>	$7,3 \pm 0,62$	$5\,604,02 \pm 186,37$
6	<i>Lemna minor</i>	$3,31 \pm 0,68$	$1\,490,35 \pm 135,67$
7	<i>Cichorium intybus</i>	$26,65 \pm 2,35$	$1\,426,86 \pm 89,33$
8	<i>Stachys palustris</i>	$6,67 \pm 1,78$	$6\,297,4 \pm 230,67$
9	<i>Persicaria bistorta</i>	$3,68 \pm 0,81$	$3\,108,31 \pm 71,4$
10	<i>Calluna vulgaris</i>	$5,41 \pm 0,72$	$7\,343,18 \pm 193,44$
11	<i>Achillea millefolium</i>	$2,79 \pm 0,58$	$9\,138,80 \pm 140,10$
12	<i>Potentilla erecta</i>	$4,11 \pm 0,61$	$5\,271,11 \pm 117,32$
13	<i>Tanacetum vulgare</i>	$5,71 \pm 0,92$	$9\,853,91 \pm 714,55$
14	<i>Hypericum perforatum</i>	$8,32 \pm 0,77$	$2\,352,39 \pm 84,56$
15	<i>Capsella bursa-pastoris</i>	$4,63 \pm 0,85$	$7\,592,32 \pm 641,62$

Каталазна активність досліджуваних об'єктів коливається в межах 828,8–9 853,91 мкмоль/л. Найвища каталазна активність спостерігається в рослинній сировині *Tanacetum vulgare* – $9\,853,91 \pm 714,55$ мкмоль/л, і *Achillea millefolium* – $9\,138,80 \pm 140,1$ мкмоль/л, а найнижча в рослинній сировині *Chenopodium album* – $828,8 \pm 72,66$ мкмоль/л.

Підвищення активності каталази запобігає пошкодженню рослинних клітин високими концентраціями пероксиду водню. На рис. 2 представлено каталазну активність досліджуваної рослинної сировини.

Як видно з рисунка (див. рис. 2), серед досліджуваних рослин мінімальні показники каталазної активності в сировині

Chenopodium album, *Arctium lappa*, *Plantago major*, *Lemna minor* і *Cichorium intybus*.

Водночас у значній кількості досліджуваних рослин зафіксовано високі показники каталазної активності: *Impatiens noli-tangere*, *Stachys palustris*, *Calluna vulgaris*, *Potentilla erecta*, *Capsella bursa-pastoris*, яка коливається в межах 5 271,11–7 592,32 мкмоль/л.

Варто відзначити, що серед досліджуваних об'єктів у *Cichorium intybus* і *Arctium lappa* зафіксовано найвищу пероксидазну активність і одну з найнижчих активностей каталази. Це свідчить про домінування в цих рослинних об'єктах пероксидазної активності. Прямо пропорційна ситуація в рослинній сировині *Tanacetum vulgare* і *Achillea millefolium* – домінування каталазної актив-

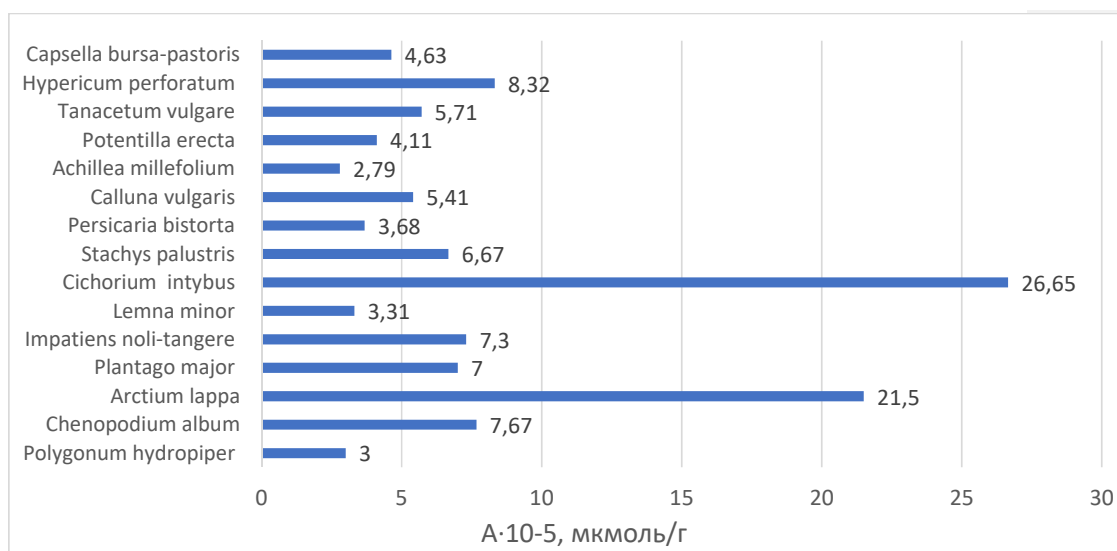


Рис. 1. Активність пероксидази в досліджуваній рослинній сировині

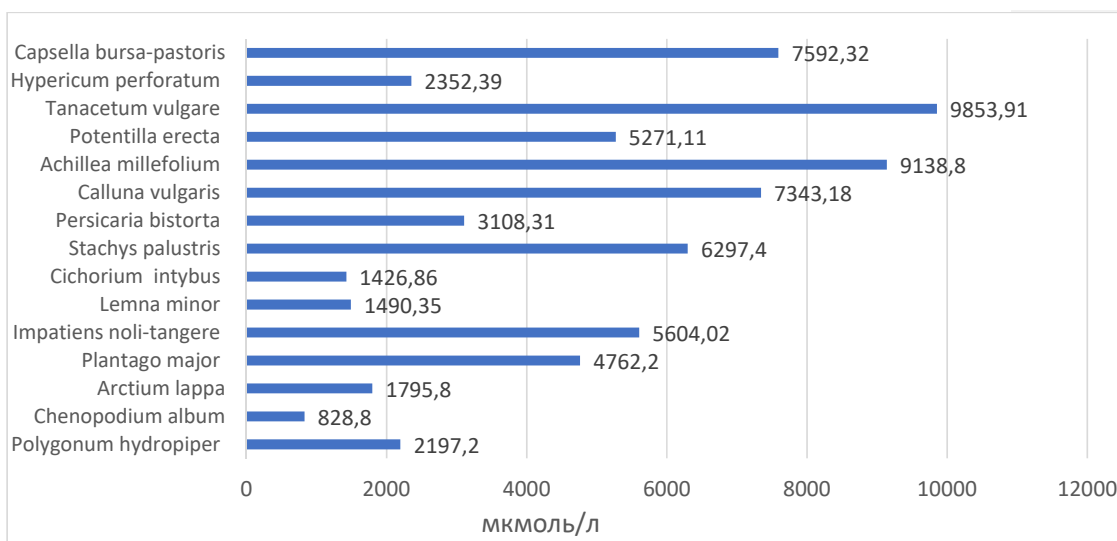


Рис. 2. Активність каталази в досліджуваній рослинній сировині

ності над пероксидазою. Результати досліджень доводять, що в рослинній сировині більшості досліджуваних лікарських рослин функціонують обидва антиоксидантні ензими, що доповнюють систему антиоксидантного захисту.

Скоординована дія неензимних антиоксидантів і антиоксидантних ензимів забезпечує ефективний контроль рівня АФК у різних компартментах рослинної клітини. Ефективність антиоксидантної системи, зокрема ензимної, є критично важливою для виживання та продуктивності рослин в умовах постійно мінливого навколишнього середовища. Розуміння механізмів функціонування ензимної антиоксидантної системи відкриває перспективи для розроблення стратегій підвищення стійкості рослин до стресових факторів, що має велике значення для збереження біорозмаїття в умовах глобальних кліматичних змін. Результати дослідження активності антиоксидантних ензимів вказують на доцільність подальшого вивчення ключових компонентів антиоксидантного захисту, вивчення їх регуляції у відповідь на стрес і розроблення методів селекції та генетичної модифікації рослин з підвищеною антиоксидантною здатністю.

Висновки

Проведені дослідження активності ензимів антиоксидантної системи лікарських рослин Передкарпаття продемонстрували важливість ензимного захисту у протидії оксидативному стресу. Встановлено, що активність пероксидази та каталази значно варіює залежно від виду рослинної сировини. Найвищу пероксидазну активність виявлено в *Cichorium intybus* і *Arctium lappa*, що свідчить про провідну роль пероксидазного шляху детоксикації АФК в цих об'єктах. Натомість *Tanacetum vulgare* і *Achillea millefolium* демонструють домінування каталазної активності, що вказує на пріоритетність іншого захисного механізму. Для більшості досліджуваних рослин характерна активність обох ензимів антиоксидантного захисту, що свідчить про скоординовану дію каталази та пероксидази в підтриманні оксидативного гомеостазу. Результати досліджень підкреслюють важливість подальшого вивчення регуляції антиоксидантних ензимів у відповідь на стресові чинники. Отримані дані можуть бути використані для селекції рослин із підвищеною антиоксидантною здатністю, що є актуальним у контексті глобальних змін клімату та збереження біорізноманіття.

Список використаної літератури

- Гойванович Н.К. Вивчення активності антиоксидантних ферментів деяких лікарських рослин Передкарпаття. *Збірник наукових праць Подільського державного аграрно-технічного університету*. 2014. Вип. 1. С. 49–51.
- Данилова Л.А. Природні антиоксиданти. *Харчова та переробна промисловість*. 2003. № 3. С. 18–19.
- Колупаєв Ю.Є., Обозний О.І. Активні форми кисню і антиоксидантна система при перехресній адаптації рослин до дії абіотичних стресорів. *Вісник Харківського національного аграрного університету*. Серія «Біологія». 2013. Вип. 3 (30). С. 18–31.
- Монастирська С.С., Волошанська С.Я., Стечик Р.Д. Антиоксидантна дія екстрактів окремих лікарських рослин. *Вісник Львівського університету*. Серія «Біологічна». 2016. Вип. 73. С. 409–412.
- Павлюк І.В., Стадницька Н.Є., Ясіцка-Місяк І., Вечорек П.П., Загорій Г.В., Брезвин О.М., Рудик Г.В., Новіков В.П. Дослідження біологічної активності вторинного екстракту зі шроту трави материнки звичайної (*Origanum vulgare*). *Український біофармацевтичний журнал*. 2015. № 1 (36). С. 21–24.
- Сафонов М.М. Повний атлас лікарських рослин. Тернопіль : Навчальна книга – Богдан, 2010. 384 с.
- Середюк К.М., Стадницька Н.Є., Яремкевич О.С., Павлюк І.В., Дякон І.В. Дослідження антиоксидантної активності екстрактів лікарських рослин. *Lviv Polytechnic National University Institutional Repository*. 2016. № 4. С. 228–232.
- Сучасні методи біохімічного аналізу рослин : навчальний посібник / Л.В. Шупранова та ін. Дніпропетровськ : Вид-во ДНУ, 2011. 80 с.
- Cheng J.S., Yuan Y.J. Release of proteins: insights into oxidative response of *Taxus cuspidata* cells induced by shear stress. *J. Mol. Catal. B: Enzymatic*. 2009. V. 58. P. 84–92.

- Jaspers P., Kangasjarvi J. Reactive oxygen species in abiotic stress signaling. *Physiol. Plant.* 2010. V. 138. P. 405–413.
- Kumar R.R., Goswami S., Sharma S.K., Singh K., Gadpayle K.A., Kumar N., Rai G.K., Singh M., Rai R.D. Protection against heat stress in wheat involves change in cell membrane stability, antioxidant enzymes, osmolyte, H₂O₂ and transcript of heat shock protein. *Int. J. Plant Physiol. Biochem.* 2012. V. 4. № 4. P. 83–91. <https://doi.org/10.5897/IJPPB12.008>.
- Mishra N., Jiang C., Chen L., Paul A., Chatterjee A., Shen G. Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms. *Front. Plant Sci.* 2023. № 14. P. 11106–22. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1110622>.
- Pavlyuk I., Stadnytska N., Jasicka-Misiak I., Gorka B., Wiczorek P., Novikov V. A study of the Chemical Composition and Biological Activity of Extracts from Wild Carrot (*Daucus carota* L.) Seeds Waste. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences.* 2015. № 6 (2). P. 603–611.
- Rajput V.D., Singh R.K., Verma K.K., Sharma L., Quiroz-Figueroa F.R., Meena M. et al. Recent developments in enzymatic antioxidant defence mechanism in plants with special reference to abiotic stress. *Biology.* 2021. № 10 (4). P. 267. <https://doi.org/10.3390/biology10040267>.
- Rasool S., Ahmad A., Siddiqi T.O., Ahmad P. Changes in growth, lipid peroxidation and some key antioxidant enzymes in chickpea genotypes under salt stress. *Acta Physiologia Plantarum.* 2013. № 35. P. 1039–1050. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-1142-4>.
- Suzuki N., Koussevitzky S., Mittler R., Miller G. ROS and redox signalling in the response of plants to abiotic stress. *Plant Cell Environ.* 2012. V. 35. P. 259–270. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02336.x>.
- Voronkova M.S., Vysochina G.I. Bistorta Scop. Genus (Polygonaceae): Chemical Composition and Biological Activity. *Chemistry for Sustainable Development.* 2014. Vol. 22. P. 207–212.
- Zhong-Guang L, Ming G. Mechanical stimulation – induced cross-adaptation in plants: an overview. *J. Plant Biol.* 2011. V. 54. P. 358–364.

References

- Hoivanovych, N.K. (2014). Vyvchennia aktyvnosti antyoksydantnykh fermentiv deiakykh likarskykh roslyn Peredkarpattia [Study of the activity of antioxidant enzymes of some medicinal plants of the Carpathian region]. *Zbirnyk naukovykh prats Podilskoho derzhavnoho ahrarnotekhnichnoho universytetu* [Collection of scientific papers of Podilskyi State Agrarian and Technical University], 1, 49–51 [in Ukrainian].
- Danylova, L.A. (2003). Pryrodni antyoksydanty [Natural antioxidants]. *Kharchova ta pererobna promyslovisht* [Food and processing industry], 3, 18–19 [in Ukrainian].
- Kolupaiev, Yu.Ye., & Oboznyi, O.I. (2013). Aktyvni formy kysniu i antyoksydantna systema pry perekhresnyi adaptatsyyi roslyn do diy abiotychnykh stresoriv [Active oxygen species and antioxidant system in cross-adaptation of plants to abiotic stressors]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Serii "Biologhiia"* [Bulletin of Kharkiv National Agrarian University. Series "Biology"], 3 (30), 18–31 [in Ukrainian].
- Monastyrskaya, S.S., Voloshanska, S.Ya, & Stetsyk, R.D. (2016). Antyoksydantna diia ekstraktiv okremykh likarskykh roslyn [Antioxidant effect of extracts of certain medicinal plants]. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Serii "Biologichna"* [Bulletin of Lviv University. Biological series], 73, 409–412 [in Ukrainian].
- Pavliuk, I.V., Stadnytska, N.Ye., Yasitska-Misiak, I., Vechorek, P.P., Zahorii, H.V., Brezvyin, O.M., Rudyk, H.V., & Novikov, V.P. (2015). Doslidzhennia biologichnoi aktyvnosti vtorynnoho ekstraktu zi shrotu travy materynky zvychnoi (*Origanum vulgare*) [Study of the biological activity of the secondary extract from the meal of oregano herb (*Origanum vulgare*)]. *Ukrainskyi biofarmatsevtichnyi zhurnal* [Ukrainian Biopharmaceutical Journal], 1 (36), 21–24 [in Ukrainian].
- Safonov, M.M. (2010). Povnyi atlas likarskykh roslyn [Complete atlas of medicinal plants]. Ternopil: Navchalna knyha – Bohdan, 384 s. [in Ukrainian].
- Serediuk, K.M., Stadnytska, N.Ye., Yaremkevych, O.S., Pavliuk, I.V., & Diakon, I.V. (2016). Doslidzhennia antyoksydantnoi aktyvnosti ekstraktiv likarskykh roslyn [Study of the antioxidant activity of medicinal plant extracts]. *Lviv Polytechnic National University Institutional Repository*, 4, 228–232 [in Ukrainian].

- Shupranova, L.V., Bilchuk, V.S., & Bohuslavska, L.V. ta in. (2011). Suchasni metody biokhimichnoho analizu roslyn: navch. posib. [Modern methods of biochemical analysis of plants: a textbook]. Donetsk: Vyd-vo DNU, 80 s. [in Ukrainian].
- Cheng, J.S., & Yuan, Y.J. (2009). Release of proteins: insights into oxidative response of *Taxus cuspidata* cells induced by shear stress. *J. Mol. Catal. B: Enzymatic*, 58, 84–92 [in English].
- Jaspers, P., & Kangasjarvi, J. (2010). Reactive oxygen species in abiotic stress signaling. *Physiol. Plant*, 138, 405–413 [in English].
- Kumar, R.R., Goswami, S., Sharma, S.K., Singh, K., Gadpayle, K.A., Kumar, N., Rai, G.K., Singh, M., & Rai, R.D. (2012). Protection against heat stress in wheat involves change in cell membrane stability, antioxidant enzymes, osmolyte, H_2O_2 and transcript of heat shock protein. *Int. J. Plant Physiol. Biochem.*, 4, 4, 83–91. <https://doi.org/10.5897/IJPPB12.008> [in English].
- Mishra, N., Jiang, C., Chen, L., Paul, A., Chatterjee, A., & Shen, G. (2023). Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms. *Front. Plant Sci.*, 14, 11106–22. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1110622> [in English].
- Pavlyuk, I., Stadnytska, N., Jasicka-Misiak, I., Gorka, B., Wiczorek, P., & Novikov, V. (2015). A study of the Chemical Composition and Biological Activity of Extracts from Wild Carrot (*Daucus carota* L.) Seeds Waste. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 6 (2), 603–611.
- Rajput, V.D., Singh, R.K., Verma, K.K., Sharma, L., Quiroz-Figueroa, F.R., & Meena, M., et al. (2021). Recent developments in enzymatic antioxidant defence mechanism in plants with special reference to abiotic stress. *Biology*, 10 (4), 267. <https://doi.org/10.3390/biology10040267> [in English].
- Rasool, S., Ahmad, A., Siddiqi, T.O., & Ahmad, P. (2013). Changes in growth, lipid peroxidation and some key antioxidant enzymes in chickpea genotypes under salt stress. *Acta Physiologia Plantarum*, 35, 1039–1050. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-1142-4> [in English].
- Suzuki, N., Koussevitzky, S., Mittler, R., & Miller G. (2012). ROS and redox signalling in the response of plants to abiotic stress. *Plant Cell Environ*, 35, 259–270. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02336.x> [in English].
- Zhong-Guang, L., & Ming, G. (2011). Mechanical stimulation – induced cross-adaptation in plants: an overview. *J. Plant Biol.*, 54, 358–364 [in English].
- Voronkova, M.S., & Vysochina, G.I. (2014). Bistorta Scop. Genus (Polygonaceae): Chemical Composition and Biological Activity. *Chemistry for Sustainable Development*, 22, 207–212 [in English].

Отримано: 24.04.2025

Прийнято: 15.05.2025



Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 12
Український журнал природничих наук
№ 12

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

УДК 591.43:597.42
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.2>

ОСОБЛИВОСТІ МОРФОЛОГІЇ ПЕЧІНКИ СТРОКАТОГО ТОВСТОЛОБИКА (*HYORPHTHALMICHTHYS NOBILIS*)

А. П. Горальський¹, Н. В. Демус², І. М. Сокульський³, Б. В. Гутий⁴,
О. В. Павлюченко⁵, С. Ю. Шевчук⁶

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

² кандидат ветеринарних наук, доцент,
доцент кафедри нормальної та патологічної морфології і судової ветеринарії
(Львівський національний університет ветеринарної медицини
та біотехнологій імені С. З. Гжицького, м. Львів)
e-mail: demus2nv@gmail.com
ORCID: 0000-0002-0793-0484

³ кандидат ветеринарних наук, доцент,
доцент кафедри внутрішньої патології та морфології
(Поліський національний університет, м. Житомир)
e-mail: sokulskiy_1979@ukr.net
ORCID: 0000-0002-6237-0328

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

⁵ кандидат біологічних наук, доцент,
завідувачка кафедри зоології, біологічного моніторингу та охорони природи
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: pavluchenkolessia@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2783-1037

⁶ кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри зоології, біологічного моніторингу та охорони природи
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: dzhgutyk@ukr.net
ORCID: 0000-0001-6374-1859

Для визначення еколого-токсикологічної ситуації та оцінки впливу різних несприятливих факторів водного середовища на водні організми слід здійснювати морфологічний аналіз окремих органів, які насамперед піддаються негативному впливу.

У статті подані результати досліджень щодо гістологічних та ультрамікроскопічних особливостей будови печінки кісткової риби родини корокових: строкатого товстолобика – *Hypophthalmichthys nobilis* (Eschmeyer, 2003). Проведено аналіз мікроструктури печінкової тканини з використанням світлової мікроскопії та ультрамікроскопічних методів, що дало змогу виявити ключові морфологічні та функціональні особливості органа.

Встановлено, що в процесі філогенетичного розвитку риб, які розвиваються у водному середовищі, відбувається певна структурна перебудова печінки: адаптації до різноманітних умов існування супроводжувалися зміною ряду параметрів морфологічної будови печінки. У строкатого товстолобика (рослинної) печінка трилопатева. Для товстолобика характерною ознакою печінки є наявність гепатопанкреаса (печінка та підшлункова залози, асоційовані в єдиний орган).

Особливістю мікроскопічної будови печінки родини корокових є слабкорозвинена міжчасточкова сполучна тканина, а паренхіма часточки печінки має трубчасту будову у вигляді багатограних, ламаних товстостінних трубочок, стінками яких є гепатоцити. Ці трубочки представлені синусоїдними капілярами, які забезпечують ефективний обмін речовин між кров'ю та клітинами печінки, сприяючи детоксикації організму й обробці поживних речовин. У таких трубочках також спостерігаються великі запаси глікогену, що свідчить про високий рівень метаболічної активності та здатність печінки корокових риб до накопичення енергетичних ресурсів.

Досліджено стан гепатоцитів, судинної системи печінки та структурні зміни, що виникають під впливом різних екологічних і фізіологічних факторів. Встановлено основні адаптивні механізми тканини печінки, які забезпечують її функціональну активність у строкатого товстолобика. Проведені результати розширюють і доповнюють відомості про макро- та мікроскопічну будову печінки щодо видових особливостей корокових риб у відповідних розділах анатомії, гістології, порівняльної анатомії, зоології тощо.

Ключові слова: хребетні тварини, порівняльна анатомія, мікроскопічна будова, дослідження органів, кісткові риби, гепатоцити, органели.

MORPHOLOGICAL FEATURES OF THE LIVER IN BIGHEAD CARP (*HYPOPHTHALMICHTHYS NOBILIS*)

**L. P. Horalskyi, N. V. Demus, I. M. Sokulskiy, B. V. Gutyj, O. V. Pavliuchenko,
S. Y. Shevchuk**

To determine the ecological and toxicological situation and assess the impact of various adverse factors in the aquatic environment on aquatic organisms, it is essential to conduct a morphological analysis of specific organs that are most susceptible to negative influences.

This article presents the results of research on the histological and ultrastructural features of the liver in a bony fish from the Cyprinidae family – the bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) (Eschmeyer, 2003). An analysis of the microstructure of the liver tissue was conducted using light microscopy and ultrastructural methods, which allowed for the identification of key morphological and functional characteristics of the organ.

It has been established that during the phylogenetic development of fish living in aquatic environments, a certain structural reorganization of the liver occurs. Adaptations to various environmental conditions were accompanied by changes in several morphological parameters of the liver. In the bighead carp (a herbivorous species), the liver is trilobate. A distinctive feature of the bighead carp's liver is the presence of a hepatopancreas – a combined organ formed by the liver and pancreas.

A characteristic feature of the microscopic structure of the Cyprinidae liver is the poorly developed interlobular connective tissue. The liver parenchyma has a tubular structure in the form of polygonal, irregularly shaped thick-walled tubules, with their walls composed of hepatocytes. These tubules are surrounded by sinusoidal capillaries that facilitate effective metabolic exchange between the blood and liver cells, contributing to detoxification and nutrient processing. Large glycogen deposits are also observed in these tubules, indicating a high level of metabolic activity and the liver's ability to store energy resources.

The study examined the condition of hepatocytes, the vascular system of the liver, and structural changes arising from various ecological and physiological factors. The primary adaptive mechanisms of liver tissue that ensure its functional activity in the bighead carp were identified.

The results obtained expand and complement existing knowledge on the macro- and microscopic structure of the liver, contributing to the fields of anatomy, histology, comparative anatomy, zoology, and related disciplines regarding the species-specific features of Cyprinidae fish.

Key words: *vertebrates, comparative anatomy, microscopic structure, organ studies, bony fish, hepatocytes, organelles.*

Вступ

Сільськогосподарський сектор України характеризується значним потенціалом завдяки наявності родючих ґрунтів, сприятливих кліматичних умов і водних ресурсів, що створює всі необхідні умови для виробництва широкого спектра аграрної продукції (Махиборода, 2019).

З огляду на зростання чисельності населення світу аквакультура виступає одним із найперспективніших напрямів харчової індустрії, здатним забезпечити потребу в якісному тваринному білку без шкоди для природних рибних ресурсів (Рудь, 2021). Забезпечення потреб населення продуктами харчування загалом і аквакультури зокрема можливе лише за розвитку та запровадження новітніх технологій у тваринництві, зокрема в галузі рибного господарства (Irm et al., 2020; Дюдяєва і Рутта, 2021). Інноваційні підходи та сучасні методи вирощування риб дають змогу підвищити ефективність виробництва, забезпечити сталість та екологічну безпеку процесів, а також знизити витрати на ресурси, зберігаючи при цьому високу якість продукції (Jannathulla et al., 2019; Laktuka et al., 2023).

Не викликає сумніву, що застосування новітніх технологій у галузі рибництва щодо вирощування риби, засобів профілактики захворювань різноманітного генезу може викликати морфофункціональні зміни, порушувати гомеостаз в організмі риб, що призведе до появи нових захворювань або ж до нетипового перебігу існуючих (Matras et al., 2019). До того ж за впливу різних технологічних чинників за використання нових технологій у рибництві у риб виникають метаболічні порушення, що негативно впливає на їх продуктивність та формування імунітету (Главатчук, 2024).

Важливими чинниками, які формують продуктивні якості, є виробничі процеси, які безпосередньо пов'язані із живленням риби: за споживання корму відбувається взаємозв'язок організму риб із навколишнім середовищем (Корженевська та ін., 2019; Ну, 2020). Не викликає сумніву, що раціональним живленням риби в природних умовах є природні корми (Abhijith et

al., 2016; Ali et al., 2022), водночас корекція годівлі у виробничих умовах за використання різноманітних комбикормів, збалансованих за макро- та мікроелементами тощо, суттєво впливає на продуктивні якості промислових риб, залежно від видових особливостей риби, їх фізіологічних особливостей процесів травлення, впливаючи при цьому на макро- та мікроскопічну будову органів травлення, а саме печінку (Taddesse, 2014; Glencross, 2024; Maulu, 2024). Крім того, умови харчування риб, якість корму, його склад достеменно впливають на морфофункціональний стан риби, їх соматичні ознаки, обмін речовин тощо (Машкова і Шарамок, 2023; Cui et al., 2024). Також відмічено, що важливим питанням щодо забезпечення та підвищення продуктивних якостей риби є анатомічні особливості апарату травлення, фізіологічні процеси, які відбуваються в організмі риб, зокрема у травних залозах, до яких належать печінка й підшлункова залоза (Chanet et al., 2023). Тому адаптація різних видів риби до споживання певних кормів, їх перетравлення значною мірою залежить від морфофізіологічних особливостей апарату травлення, зокрема печінки, яка виконує важливі функції для організму: синтезує жовч, білки плазми крові, є депо глікогену, ліпідів та вітамінів, знешкоджує токсичні речовини ендо- та екзогенного характеру, бере участь у кровотворенні (Georgieva, 2016; Олійник 2017; Balakrishna, 2024). Усі фізіологічні процеси в печінці риб, що є холоднокровними (пойкілотермними) тваринами, на відміну від теплокровних (клас ссавці та птахи), мають безпосередню кореляцію з умовами навколишнього середовища, у якому вони існують (Присяжнюк і Онищенко, 2016; Honcharova, 2021). Температура води, її хімічний склад, рівень кисню й інші екологічні фактори безпосередньо впливають на метаболічні процеси в печінці риб, як-от синтез і розподіл поживних речовин, детоксикація та енергетичний обмін. Зокрема, зі зміною температури води спостерігається зміна швидкості ферментативних реакцій у печінці, що відображає здатність організму до адапта-

ції до нових умов середовища (Al-Ghanim, 2014; Vodianitskyi, 2020; Kukhtyn et al., 2022). Таким чином, фізіологічна діяльність печінки риб є не лише результатом внутрішніх процесів організму, а й безпосередньо залежить від змін, що відбуваються в навколишньому середовищі, де ці тварини проживають.

Матеріал і методи

Під час проведення наукових досліджень дотримувалися встановлених норм лабораторної практики GLP (1981 р.) та положень «Загальних етичних принципів експериментів на тваринах», ухвалених Першим Національним конгресом з біоетики (м. Київ, 2001 р.). Експерименти виконувалися відповідно до міжнародних стандартів, зокрема «Європейської конвенції про захист хребетних тварин, які використовуються в експериментах та інших наукових цілях» (Страсбург, 1986 р.), «Правил проведення робіт із використанням експериментальних тварин» згідно з наказом МОЗ № 281 від 1 листопада 2000 р. «Про заходи щодо вдосконалення організації роботи з використанням експериментальних тварин», а також відповідно до Закону України «Про захист тварин від жорстокого поводження».

Роботу виконували у співпраці кафедр вищих навчальних закладів: кафедри нормальної та патологічної морфології і судової ветеринарії Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького; кафедри зоології, біологічного моніторингу та охорони природи Житомирського державного університету імені Івана Франка; кафедри нормальної і патологічної морфології, гігієни та експертизи Поліського національного університету.

Підбір тварин проводили в літньо-осінній період із врахуванням їх віку. У порівняльно-анатомічному ряді використовували статевозрілі тварини, 2-річного віку масою $641,3 \pm 2,3$ г. Оцінку статевої зрілості визначали за масою тварини (Горальський та ін., 2019).

Клінічний огляд риби, оцінку екстер'єрних (зовнішній вигляд, маса тіла тварин) та інтер'єрних (лінійні параметри, абсолютна та відносна маса органа) параметрів після анатомічного розтину проводили згідно з рекомендаціями морфологічних посібників (Горальський та ін., 2019). Для запобігання негативного впливу стрес-чинників рибу перед розтином присипляли розчином гіпнодиду (6–10 мл/л).

Об'єктом для дослідження була печінка, шматочки якої для гістологічних досліджень фіксували у 10%-му водному розчині нейтрального формаліну та в рідині Карнуа з подальшою швидкою заливкою у парафін (Горальський та ін., 2019). Для вивчення загальної характеристики печінки, стану їх структур та проведення морфометричних досліджень виготовляли серійні парафінові зрізи з подальшим фарбуванням гематоксином та еозином (Горальський та ін., 2019). Для одержання об'єктивних критеріїв структурної організації печінки використовували кількісні морфометричні методи дослідження (Горальський та ін., 2019).

Відбір матеріалу для електронномікроскопічних досліджень печінки проводили згідно з рекомендаціями, запропонованими в посібнику (Горальський та ін., 2019). Для цього вирізали шматочки органа об'ємом до 1 мм³, занурювали у фіксуючу суміш – 1%-й розчин тетраоксиду осмію на буфері Колфілда на 2 години. Потім, після промивання матеріалу 0,1 М фосфатним буфером (3 рази по 30 хв) та дегідратації його у спиртах наростаючої міцності (50°, 70°, 90°, 100° по 10 хв з триразовою зміною у кожній із порцій), шматочки контрастували у 2%-му розчині уранілу ацетату, приготованому на спирті 70°. Після цього матеріал проводили через абсолютний спирт з ацетоном (10 хв), через ацетон (10 хв). Далі поміщали в суміш ацетону з епоксидними смолами (3 : 1 – 30 хв; 1 : 1 – 1 год) та чисту смолу впродовж 1 год. Зразки матеріалу закладали в желатинові капсули, заливали епоксидними смолами з додаванням каталізатора з подальшим поміщенням їх у термостат ($t + 56^\circ\text{C}$) для полімеризації на 24 год. Ультратонкі зрізи (50–60 нм) виготовляли на ультрамікротомі LKB (Швеція) Tesla BS-490A, монтували на мідні бленди $d = 1$ мм, контрастували розчинами уранілу ацетату і цитрату свинцю за Рейнольдсом та вивчали за допомогою електронного мікроскопа ПЕМ-125К (Україна) з відеокамерою DX 2, КАРРА з подальшим фотографуванням зі збільшенням (у 6400, 8000 та 10 000 разів).

Для забезпечення точності й деталізації мікроструктурних характеристик тканин мікрофотографування гістологічних препаратів здійснювали за допомогою відеокамери CAM V200, вмонтованої в мікроскоп Micros MC-50, і цифрового фотоапарата. Отримані цифрові зображення були систематизовані та піддані статистичному аналізу. Математична обробка результатів

досліджень була розроблена статистично з використанням програмного пакета Statistica 7.0 програмного забезпечення (StatSoft, Талса, США). Відмінності між величинами в контрольній та експериментальній групах визначали за допомогою ANOVA, де відмінності вважалися достовірними, якщо $P < 0,05$ (з урахуванням похибки Бонферроні).

Результати

Печінка у строкатого товстолибика розташована у вентральній ділянці порожнини тіла, між петлями кишечника. Краніально вона межує з навколосерцевою сумкою, вентрально – обмежена передньою камерою плавального міхура, а каудально – його задньою камерою.

Макроскопічно печінка строкатого товстолибика утворена трьома лопатями та має пуху консистенцію і буро-червоний колір. Абсолютна маса печінки, згідно з органометричними дослідженнями, становить $8,822 \pm 0,734$ г, відносна – $1,375\%$, її довжина дорівнює $11,808 \pm 0,432$ см, ширина – $3,402 \pm 0,194$ см.

Гістологічними дослідженнями з'ясовано, що часточки печінки у строкатого товстолибика мають багатогранну форму. При цьому міжчасточкова сполучна тканина печінки виражена слабко й помітна лише навколо печінкових триад, де чітко диференціюються видовженої форми фіброblastи та колагенові волокна (рис. 1).

Печінкові часточки сформовані печінковими залозистими трубочками, жовчними

капілярами та синусоїдними гемокапілярами (рис. 2). Усередині кожної часточки розташована центральна вена.

Секреторні трубочки паренхіми печінки побудовані із 6–8 і більше гепатоцитів, які контактують між собою за допомогою десмосом. Кожна така трубочка на поперечному зрізі має вигляд багатогранної, ламаної товстостінної структури, стінками яких є гепатоцити, у центрі яких чітко виявляється центральний просвіт (жовчний капіляр) (рис. 3). Жовчні капіляри не мають власної стінки, остання сформована поверхнями клітинних мембран біліарних полюсів гепатоцитів. Між печінковими трубочками містяться кровоносні міжчасточкові капіляри, стінка яких утворена васкулярними полюсами гепатоцитів. Біліарний полюс гепатоцитів, який спрямований до просвіту жовчного капіляру, виділяє у нього жовч, васкулярний полюс, що спрямований до кровоносного внутрішньочасточкового капіляра, виділяє глюкозу, сечовину.

Гепатоцити часточок печінки, на поздовжньому зрізі хаотично розташовані в паренхімі органа (рис. 4). Така особливість будови пов'язана з тим, що печінкові часточки у строкатого товстолибика мають трубчасту будову, а не пластинчасту, як у тварин класу ссавці.

Гепатоцити строкатого товстолибика мають полігональну форму та чітко оконтуровані та тлі паренхіми часточок. Їх цитоплазма за фарбування гістопрепаратів гематоксиліном та еозином по-різному

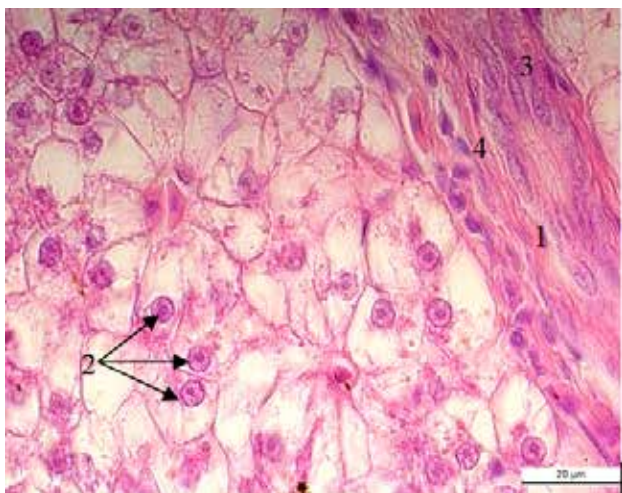


Рис. 1 Фрагмент мікроскопічної будови часточки печінки строкатого товстолибика:

- 1 – міжчасточкова сполучна тканина;
- 2 – гепатоцити; 3 – фіброblastи;
- 4 – колагенові волокна. Ван-Гізон. X 600

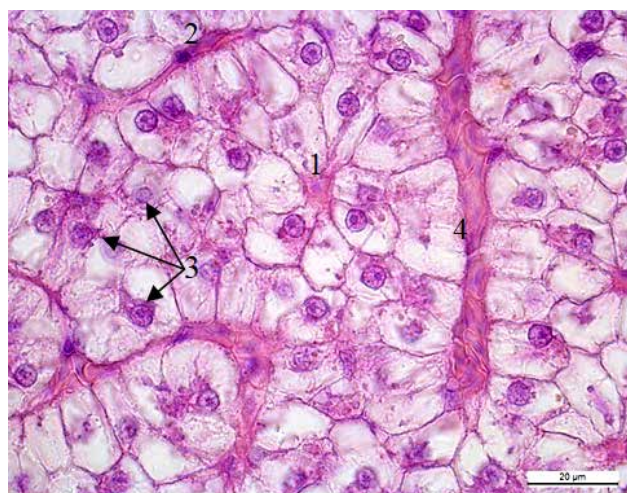


Рис. 2. Фрагмент мікроскопічної будови часточки печінки строкатого товстолибика:

- 1 – секреторна трубочка; 2 – жовчний капіляр; 3 – гепатоцити; 4 – гемокапіляр.
- Гематоксилін та еозин. X 600

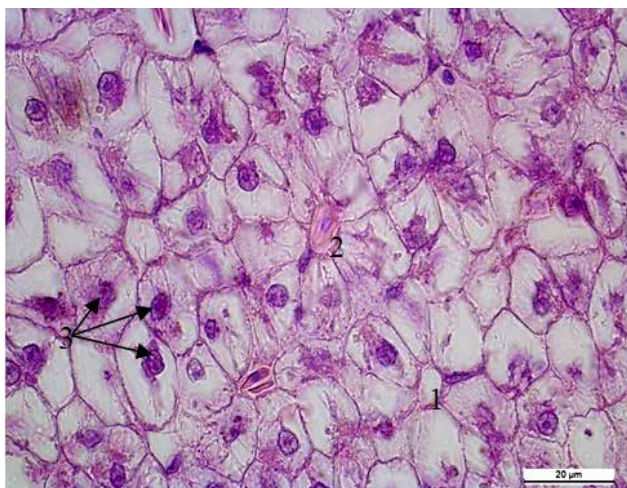


Рис. 3. Фрагмент мікроскопічної будови часточки печінки строкатого товстолобика: 1 – секреторна трубочка; 2 – жовчний капіляр; 3 – гепатоцити. Гематоксилін та еозин. X 600

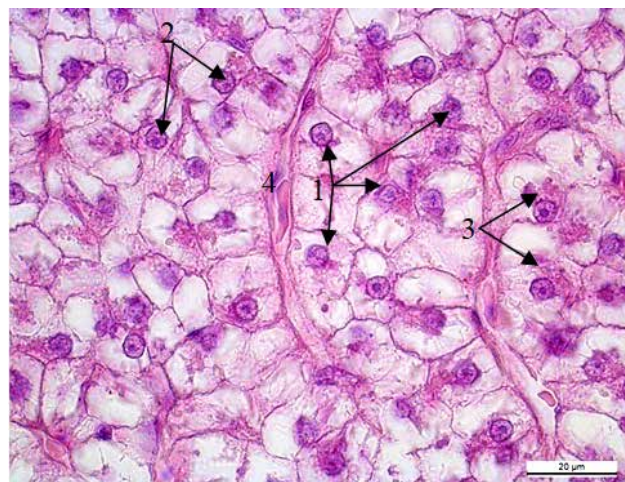


Рис. 5. Фрагмент мікроскопічної будови часточки печінки строкатого товстолобика: 1 – гепатоцити; 2 – ядра гепатоцитів; 3 – ацидофільна зернистість цитоплазми; 4 – гемокапіляр. Гематоксилін та еозин. X 600

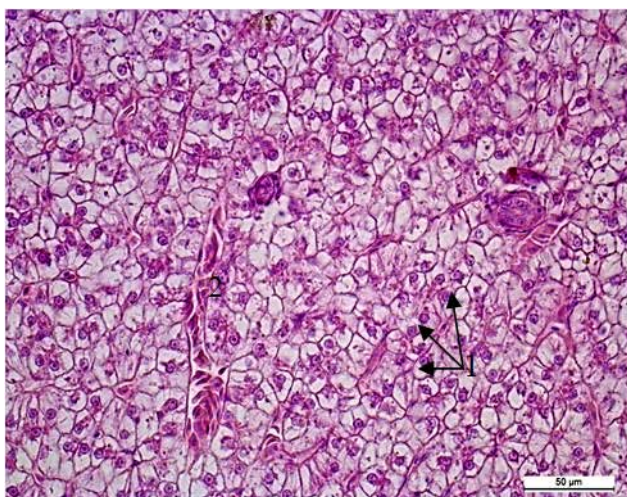


Рис. 4. Фрагмент мікроскопічної будови часточки печінки строкатого товстолобика: 1 – гепатоцити; 2 – гемокапіляр. Гематоксилін та еозин. X 400

сприймає забарвлення та містить у своїй цитоструктурі незначні ацидофільні вclusions у вигляді дрібної зернистості, тому цитоплазма окремих гепатоцитів має пінистий вигляд (рис. 5).

Ядра гепатоцитів мають округлу форму та чітко виражені ядерця, містяться вони у їх центрі або ж ексцентрично. Поряд з одноядерними гепатоцитами інколи зустрічаються двоядерні форми клітин. Ядра переважно мають щільну консистенцію та дещо зменшені в розмірах, тому чітко диференціюються у структурі клітин на тлі неза-

фарбованої цитоплазми (рис. 5). У значній кількості гепатоцитів унаслідок дифузного скупчення у їх цитоплазмі жирових включень ядра часто зміщуються до периферії цитоплазми, ближче до її синусоїдного краю (рис. 5).

Згідно із цитоморфометричними дослідженнями, середній об'єм гепатоцитів печінки строкатого товстолобика становить $4,964 \pm 0,302$ мкм³, середній об'єм їх ядер – $0,302 \pm 0,026$ мкм³, а ЯЦВ – $0,0648 \pm 0,0064$ (табл. 1).

Характерною особливістю печінки строкатого товстолобика є те, що в різних ділянках печінкових часточок виявляються скупчення панкреатоцитів (рис. 6), які сформовані з 15–35 та більше клітин у вигляді острівців, що формують структури, подібні за будовою до ацинусів екзокринної частини підшлункової залози у ссавців (рис. 6).

Панкреатоцити мають призматичну форму, їх цитоплазма за фарбування гістопрепаратів гематоксиліном та еозином неоднорідно сприймає забарвлення: біля ядра базофільна; подальше від ядра – ацидофільна, з наявністю значної кількості ацидофільної зернистості (рис. 6).

За результатами гістометричних досліджень середня площа печінкової часточки, асоційованої зі скупченнями панкреатоцитів строкатого товстолобика становить $552,04 \pm 96,85$ мкм². При цьому площа панкреаса в одній часточці печінки строкатого товстолобика займає $74,88 \pm 4,51$ мкм² (13,56%), а відношення площі панкреаса до

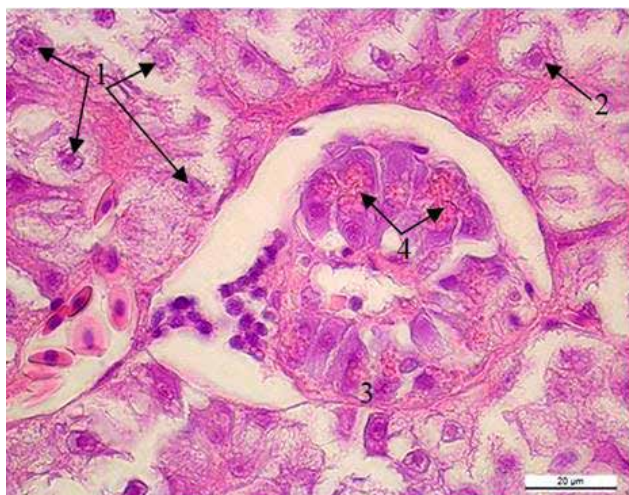


Рис. 6. Фрагмент мікроскопічної будови часточки печінки строкатого товстолобика:
1 – гепатоцити; 2 – ядра гепатоцитів
3 – гепатопанкреас; 4 – ацидофільна зернистість цитоплазми панкреатоцитів.
Гематоксилін та еозин. X 600

загальної площі печінкової часточки становить 1 : 6,4 (табл. 1).

За результатами цитоморфометрії середній об'єм панкреатоцитів дорівнює $2,004 \pm 0,198$ мкм³, об'єм їх ядер – $0,036 \pm 0,005$ мкм³, ЯЦВ – $0,0183 \pm 0,0062$.

Згідно з ультрамікроскопічними дослідженнями, гепатоцити печінки строкатого товстолобика мають полігональну форму: багатогранну, округлу, овальну. Вони чітко оконтуровані плазматичною мембраною, яка складається з трьох шарів: зовнішнього, внутрішнього темного та між ними (розділяє

їх) світлого шару. Плазмолема гепатоцитів здебільшого нерівна, має звивисту форму та часто формує окремі виступи та інвагінації. Між гепатоцитами, які формують залозисті трубочки, міститься вузький, інколи розширений міжклітинний простір (рис. 7).

Гепатоцити мають декілька біліарних полюсів, плазматична мембрана яких утворює короткі мікроворсинки. При цьому плазматичні мембрани поряд розташованих гепатоцитів щільно контактують між собою за допомогою виростів плазмолеми у вигляді мікроворсинок, які спрямовані в напрямку гемосинусоїдних капілярів (рис. 8). Такі вну-

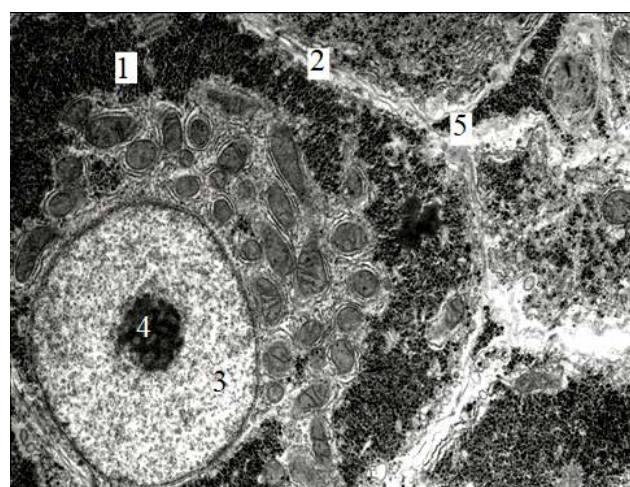


Рис. 7. Фрагмент ультрамікроскопічної будови печінки строкатого товстолобика:
1 – гепатоцит; 2 – цитоплазматична оболонка; 3 – ядро; 4 – ядерце;
5 – міжклітинний простір. X 6400

Таблиця 1
Морфометричні показники структур печінки строкатого товстолобика ($\bar{x} \pm SD$, $n = 6$)

Показники	Одиниці виміру	Цифрові показники
Площа печінкової часточки, асоційована зі скупченням панкреатоцитів (гепатопанкреас)	мкм ²	$552,04 \pm 96,85$
Площа скупчень панкреатоцитів (панкреаса)	мкм ²	$74,88 \pm 4,51$
	%	13,56
Площа печінкової часточки:	мкм ² ;	$477,16 \pm 82,71$
	%	86,44
Відношення площі панкреаса до площі печінкової часточки		1 : 6,4
Діаметр центральних вен	мкм	$5,974 \pm 0,398$
Об'єм гепатоцитів	мкм ³	$4,964 \pm 0,302$
Об'єм ядер гепатоцитів	мкм ³	$0,302 \pm 0,026$
ЯЦВ гепатоцитів	ум. од.	$0,0648 \pm 0,0064$
Об'єм панкреатоцитів	мкм ³	$2,004 \pm 0,198$
Об'єм ядер панкреатоцитів	мкм ³	$0,036 \pm 0,005$
ЯЦВ панкреатоцитів	ум.од.	$0,0183 \pm 0,0062$

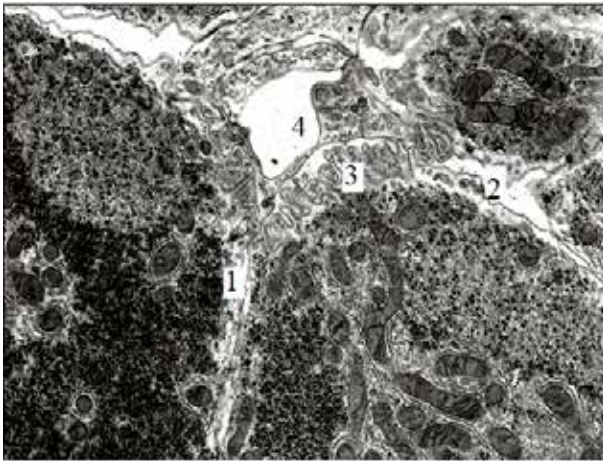


Рис. 8. Фрагмент ультрамікроскопічної будови печінки строкатого товстолибика: 1 – контакти гепатоцитів; 2 – цитоплазматична оболонка; 3 – мікроборсинки; 4 – просвіт гемосинусоїдного капіляра. X 6400

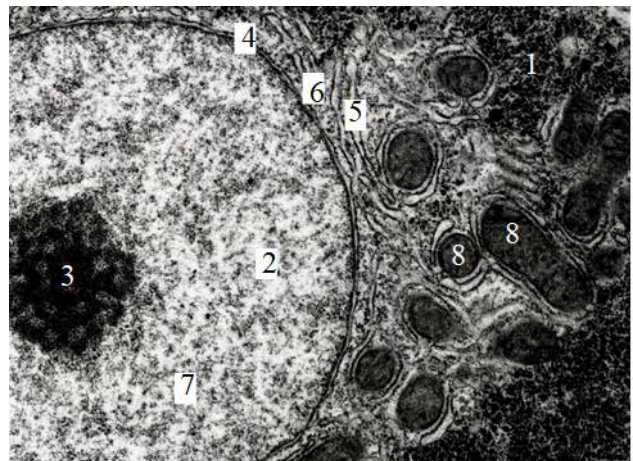


Рис. 9. Фрагмент ультрамікроскопічної будови гепатоцита печінки строкатого товстолибика: 1 – цитоплазма; 2 – ядро; 3 – ядерце; 4 – ядерна мембрана; 5 – гранулярна ендоплазматична сітка; 6 – контакт зовнішнього шару ядерної мембрани з мембранами гранулярної ендоплазматичної сітки; 7 – еухроматин; 8 – мітохондрії. X 6400

трішньочасточкові капіляри синусоїдного типу мають достатньо виразний широкий просвіт, стінка яких сформована ендотеліоцитами сильно ущільненої форми.

Гепатоцити мають велике (інколи два) ядро округлої чи овальної форми, яке оконтуроване щільною ядерною мембраною. Остання складається з двох шарів (внутрішнього та зовнішнього), які відокремлені між собою перинуклеарним простором. Згідно з ультрамікроскопічними дослідженнями, перинуклеарний простір нерівномірно розширений (рис. 9). У двошаровій ядерній мембрані виявляються каналні (пори). Зовнішній шар ядерної мембрани іноді контактує з мембранами гранулярної ендоплазматичної сітки. При цьому перинуклеарний простір без чіткої межі переходить у порожнину гранулярної ендоплазматичної сітки. Сама нуклеоплазма має світле забарвлення та містить електронно-прозорий матрикс і рівномірно розміщений еухроматин. На периферії нуклеоплазми інколи виявляється гетерохроматин (рис. 9). У центрі каріоплазми (рис. 9) або ж ексцентрично (рис. 10) розташовані переважно великих розмірів ядерця, побудовані з волокнистого та гранулярного компонентів.

У цитоплазмі гепатоцитів наявні чітко сформовані органели: рибосоми, гранулярна й агранулярна ендоплазматична сітки, мітохондрії, лізосоми, комплекс Гольджі.

За результатами наших електронно-мікроскопічних досліджень значна частка цитоплазми гепатоцитів у риб зайнята базофільною (хроматофільною) речовиною, що сформована рибосомами, полісомами та цистернами гранулярної ендоплазматичної сітки, різноманітної за величиною. При цьому гранулярна ендоплазматична сітка частіше розташована в навколядерній та

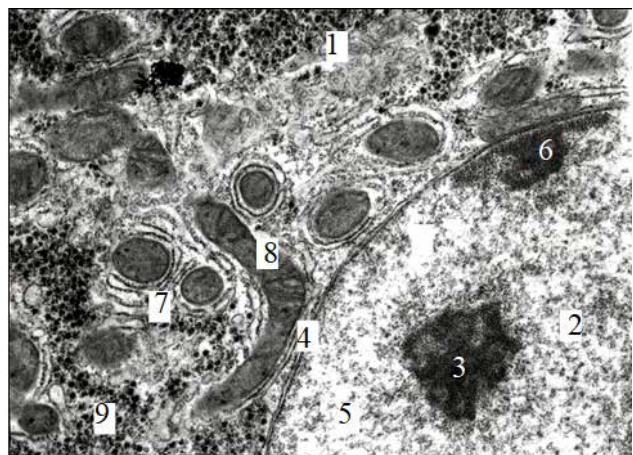


Рис. 10. Фрагмент ультрамікроскопічної будови гепатоцита печінки строкатого товстолибика: 1 – цитоплазма; 2 – ядро; 3 – ядерце; 4 – ядерна мембрана; 5 – еухроматин; 6 – гетерохроматин; 7 – гранулярна ендоплазматична сітка; 8 – мітохондрії; 9 – жирові включення. X 6400

центральної зоні цитоплазми (рис. 11), а також на периферії тіла гепатоцита. Вона сформована широкими, майже завжди паралельними цистернами, які розділені між собою майже однаковими проміжками. Цистерни часто з'єднуються між собою анастомозами.

У цитоплазмі гепатоцитів риби є дуже багато вільних рибосом і полісом. Вільні рибосомы зазвичай розміщуються в цитоплазматичному матриксі між цистернами ендоплазматичної сітки або ж кріпляться до зовнішньої поверхні мембран ендоплазматичної сітки. Навколо ядра гепатоцитів або ж в інших ділянках цитоплазми міститься комплекс Гольджі, який складається з паралельно розміщених цистерн і мікро- та макропухирців. Його цистерни зазвичай звужені, а деякі розширені. Інколи зустрічаються розгалуження його цистерн, окремі гілки яких поєднуються одна з одною за допомогою анастомозів. Біля комплексу Гольджі розташовані лізосоми різної форми та розмірів, переважно округлої чи овальної форми, які оточені одношаровою мембраною.

Навколо ядра, у конденсованій організації цитоплазми, виявляється значна кількість різних за величиною (малих, середніх, великих розмірів) та формою (округлі, овальні, сферичні, видовжені, ниткоподібні, паличкоподібні, гантелеподібні) мітохондрій. При цьому частіше домінує округла або ж овальна форми (рис. 11, 12).

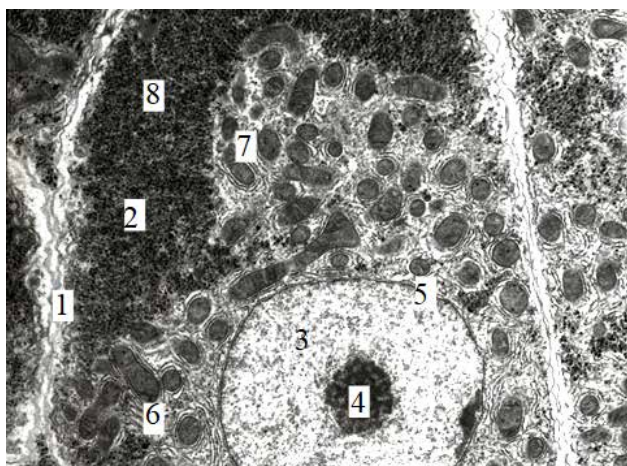


Рис. 11. Фрагмент ультрамікроскопічної будови гепатоцита печінки строкатого товстолобика: 1 – цитоплазматична оболонка; 2 – цитоплазма; 3 – ядро; 4 – ядерце; 5 – ядерна мембрана; 6 – гранулярна ендоплазматична сітка; 7 – мітохондрії; 8 – жирові включення. X 6400

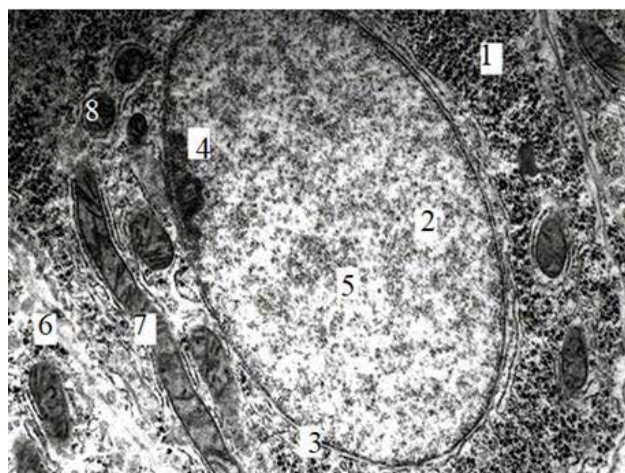


Рис. 12. Фрагмент ультрамікроскопічної будови гепатоцита печінки строкатого товстолобика: 1 – цитоплазма; 2 – ядро; 3 – ядерна мембрана; 4 – гетерохроматин; 5 – еухроматин; 6 – гранулярна ендоплазматична сітка; 7 – мітохондрія ниткоподібної форми; 8 – мітохондрії округлої форми. X 6400

Останні часто оточені цистернами ендоплазматичного ретикулуку і здебільшого виявляються навколо ендоплазматичної сітки (рис. 11, 12). Мембрани мітохондрій мають чітко виражені контури і за своєю будовою подібні до поверхневої мембрани клітин, яка складається з темних зовнішнього та внутрішнього шарів, а також світлого шару, що їх розмежовує. Усередині мітохондрій містяться короткі, паралельні одна одній кристи, утворені складками внутрішнього шару мембрани. Розміщені кристи в мітохондріях досить різноманітно: у частини мітохондрій – перпендикулярно, в інших – паралельно до довгої осі мітохондрій. Порожнина мітохондрій заповнена електронно-прозорим матриксом (рис. 12).

У цитоплазмі гепатоцитів, крім органел загального призначення (гранулярна й агранулярна ЕС, комплекс Гольджі, мітохондрії, лізосоми), виявляються різні включення (глікоген, ліпіди, вітаміни).

За результатами проведених нами електронно-мікроскопічних досліджень виявлено, що в гепатоцитах, які містять значну кількість ліпідних включень, їх ядра через дифузне розташування жироподібних краплин витісняються на периферію цитоплазми (рис. 13). Тому вони в більшості випадків займають ексцентричне положення. Їх розміри та форма помітно відрізняються від більшості гепатоцитів, вони ущільнені

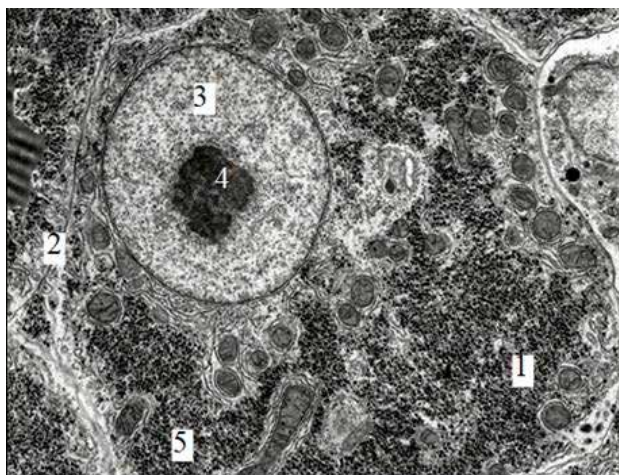


Рис. 13. Фрагмент ультрамікроскопічної будови печінки строкатого товстолобика:

1 – гепатоцит; 2 – цитоплазматична оболонка; 3 – ексцентричне розміщення ядра; 4 – ядерце; 5 – дифузні жирові включення. X 6400

та лапастеподібні (рис. 13). При цьому спостерігається зменшення перинуклеарного простору та каналців ГЕС, що вказує на пригнічення білок синтезуючої функції гепатоцитів.

Обговорення

У філогенетичному ряду хребетних тварин кісткові риби, представником яких є строкатий товстолобик, належать до таксономічних груп нижчого рівня організації. Саме вони відрізняються ступенем рухової активності (водне середовище), відповідним харчуванням, що безсумнівно впливає на морфофункціональну характеристику шлунково-кишкового тракту, а саме печінки. З огляду на це нами було проведено дослідження макро-, мікро- та ультрамікроскопічної будови печінки клінічно здорової прісноводної риби, класу кісткові, родини коропові, виду строкатий товстолобик.

Найважливішими функціями печінки є гомеостатична, депонуюча, екскреторна, метаболічна (Rekha et al., 2021). У ній відбувається знешкодження токсичних речовин ендogenous й екзогенного походження, вона виробляє жовч, необхідну для емульгування жирів. Печінка бере участь в анаболічних і катаболічних процесах обміну білків, у ній утворюються амінокислоти, необхідні для синтезу тканинних білків, а також більшість білків плазми крові, фосфоліпідів, холестерину. Печінці належить провідна роль у проміжному обміні вуглеводів, ліпі-

дів, біологічно активних речовин (гормонів, вітамінів), мінералів тощо (Payuta & Flerova, 2020; Carvalho et al., 2021; Payuta & Flerova, 2021; Pulido-Rodriguez et al., 2024).

Тому дослідження макро-, мікро- та ультрамікроскопічної будови печінки у клінічно-здорових тварин і під час проведення експериментів має не тільки фундаментальне, а й прикладне значення.

Безшлункові риби, до яких належить строкатий товстолобик, споживають планктон, рослинність, детрит невеликими порціями через незначні проміжки часу, тому їх печінка має досить важливе значення в процесах травлення. У ній формуються практично всі травні ферменти (Zhu et al., 2020; Dias et al., 2021).

Важливе значення, що відображається на будові та розташуванні печінки в порожнині тіла риби, має відношення довжини кишечника до довжини тіла, яке у всеїдних риб – коропа та карася – становить 2–3, рослиноїдних (товстолобик) – 6–15. Тому печінка прісноводної риби класу кісткові, родини коропові розгалужена та розміщена між петлями кишечника, і в більшості кісткових риб вона дволопатева, але може мати одну (у сазана, щуки, окуня) або ж три (у багатьох коропових) лопаті. Її маса може становити від 10 до 20 % маси тіла (Božidar et al., 2011; Horalskyi et al., 2023).

Згідно з результатами наших досліджень, печінка строкатого товстолобика розташована у вентральній порожнині тіла між петлями кишечника. Вона сформована трьома лопатями, має буро-червоний колір і пухку консистенцію, що зумовлено характером його живлення (Horalskyi et al., 2023). Такі макроскопічні особливості печінки та її розташування в коропових риб мають пряме відношення до форми тіла риб, яке формувалось у процесі їх життєвого циклу. Тому будова печінки у коропових риб, її розміщення достеменно пов'язані з типом травної системи (безшлункові) та формою тіла риб: тіло коропових (малорухливих риб) – щільне, валькувате, з відносно слабким вигином дорсально і майже прямою лінією вентрально.

За результатами огляду літератури, для окремих представників риби родини – щукові, сомові, лососеві тощо – характерним є наявність відокремлених травних залоз – печінки та підшлункової залози. Проте в більшості представників коропових та окуневих характерною ознакою є наявність у них гепатопанкреаса: печінки та

підшлункової залози, асоційованих у єдиний орган (Szarek, 2010; Mokhtar, 2018). Згідно з результатами наших мікроскопічних досліджень, печінка строкатого товстолобика разом із підшлунковою залозою асоційована в єдиний орган (гепатопанкреас), де скупчення панкреатоцитів присутнє в різних ділянках печінкових часточок, що, можливо, пов'язано з особливостями її васкуляризації та типом секреції тощо. При цьому середній об'єм панкреатоцитів становить $2,004 \pm 0,198$ мкм³, об'єм їх ядер – $0,036 \pm 0,005$ мкм³, а ЯЦВ – $0,0183 \pm 0,0062$.

Печінка строкатого товстолобика демонструє характерну для риб будову, яка передбачає високу організацію гепатоцитів, розвиток різноманітних органел і судинних структур. За результатами гістометричних досліджень середня площа печінкової часточки, асоційованої зі скупченнями панкреатоцитів (гепатопанкреас), у строкатого товстолобика дорівнює $552,04 \pm 96,85$ мкм². При цьому площа панкреаса в одній часточці печінки становить $74,88 \pm 4,51$ мкм² (13,56%), а відношення площі панкреаса до загальної площі печінкової часточки – 1 : 6,4.

Структурно-функціональною одиницею печінки в дослідних риб, так само як у ссавців і птахів, є часточка, між такими часточками розташована міжчасточкова сполучна тканина (Abusrer & Shtewi, 2023). Проте у строкатого товстолобика сполучно-тканинна строма слабкорозвинена, внаслідок чого часточки печінки слабо диференціюються на окремі морфофункціональні структури. За результатами гістометрії середня площа печінкових у строкатого товстолобика становить $477,16 \pm 82,71$ мкм².

Згідно з результатами мікроскопічних досліджень, часточка печінки ссавців та кісткових риб, родини коропових (Campos et al., 2017), утворена гепатоцитами, які формують печінкові пластинки. Водночас, як показують результати наших досліджень, паренхіма печінки строкатого товстолобика має трубчасту будову, подібну до такої у хребетних тварин класу птахи. Відповідно до гістометричних досліджень діаметр печінкових трубочок у строкатого товстолобика становить $4,731 \pm 0,312$ мкм. При цьому гепатоцити мають полігональну форму, у цитоплазмі яких міститься ядро, розташоване в центрі або ж ексцентрично. Аналіз досліджень свідчить, що поряд з одноядерними гепатоцитами виявляються двоядерні форми клітин, що свід-

чить, можливо, про їх посилену синтетичну діяльність (Sun, 2019).

У гепатоцитах, які формують печінкові трубочки, диференціюються дві поверхні: перша спрямована до жовчного капіляра (жовчна), інша – до синусоїдного гемокапіляра (судинна). Їх цитоплазма по-різному сприймає забарвлення та містить у своїй цитоструктурі за фарбування гістопрепаратів гематоксиліном та еозином незначні ацидофільні вклучення у вигляді дрібної зернистості, тому часто має пінистий вигляд. Це пов'язано, можливо, з тим, що основні функції печінки, як мультифункціонального органа, виконують гепатоцити, які становлять 60% від усіх клітинних елементів органа. Тому, нашу думку, слабо забарвлені гепатоцити беруть на себе виконання функцій печінки, а окремі клітини (інтенсивно забарвлені) ще перебувають у стані спокою.

Цитоплазма та каріоплазма клітин тісно взаємопов'язані між собою і складають єдину морфофункціональну систему. Тому ізольоване вивчення морфометричних характеристик окремо ядра або лише цитоплазми дає одностороннє уявлення щодо будови клітин. На сьогодні доведено, що виміри об'єму клітин (цитометрія), об'єму їх ядер (каріометрія) та особливо визначення ЯЦВ є найбільш інформативним показником щодо морфофункціонального стану клітин (Atta, 2013; Sokulskyi et al., 2021).

Отже, об'єктивним і важливим показником морфофункціонального стану печінки та клітинному рівні є цитометричні дослідження (Vicentini et al., 2005; Wilson & Castro, 2010; Kim et al., 2019), які дали змогу не тільки якісно, але й кількісно виявити параметри цитоструктур печінки у строкатого товстолобика. Так, за результатами наших цитометричних досліджень середній об'єм гепатоцитів печінки строкатого товстолобика становить $4,964 \pm 0,302$ мкм³, середній об'єм їх ядер – $0,302 \pm 0,026$ мкм³, а ЯЦВ – $0,0648 \pm 0,0064$, що вказує на високий рівень морфофункціонального стану гепатоцитів та їх метаболічну активність.

Важливими маркерними ознаками морфофункціонального стану органів і тканин у тварин є електронно-мікроскопічні дослідження, які дають можливість з'ясувати їх будову на ультрамікроскопічному рівні та підтвердити чи спростувати мікроархітектоніку клітин і тканин за світлової мікроскопії (Zahaby et al., 2024).

Тож на сьогодні в наукових дослідженнях широко використовують електронну

мікроскопію, за якої переважно досліджують ті самі об'єкти, що і за світлової мікроскопії. Проте вона має значні переваги, за яких можна з'ясувати особливості мікроскопічної будови клітин і тканин на різних рівнях їх структурної організації у нормі та за патології, що неможливо виявити за світлової мікроскопії (Горальський та ін., 2019). Цим і було аргументоване застосування цього методу для проведення морфофункціональної оцінки печінки строкатого товстолобика.

Так, за результатами наших електронно-мікроскопічних досліджень печінки клінічно здорової прісноводної риби (клас кісткові, родина коропові, вид строкатий товстолобик) були підтверджені спостереження, які ми виявляли на світлооптичному рівні. При цьому ультраструктурна будова гепатоцитів містить значну кількість клітинних органел: гранулярна та гранулярна ендоплазматична сітки, мітохондрії, лізосоми, рибосоми, комплекс Гольджі. Велика кількість лізосом і мітохондрій вказує на високу активність обмінних процесів, зокрема метаболізму білків і ліпідів. Гепатоцити мали світлу нуклеоплазму та великі ядра. Ядра були чітко контуровані завдяки добре вираженій ядерній мембрані. Інколи гепатоцити мали два ядра. Перинуклеарний простір був нерівномірно розширений. Ядерний хроматин рівномірно розподілений по каріоплазмі, унаслідок чого ядра мали середню електронну щільність. Навколо ядра зосереджена велика кількість поліморфних мітохондрій, які щільно оточені цистернами ендоплазматичного ретикулуму.

Водночас синтетична та депонуюча функції гепатоцитів відображалися не тільки в будові та кількості ядер і клітинних органел, а й у наявності клітинних включень (Rejane & Vildes, 2008). Їхня морфологічна будова є відображенням складних біохімічних процесів, що відбуваються у клітині. Так, за результатами наших електронно-мікроскопічних досліджень у гепатоцитах, які містили значну кількість ліпідних включень, їх ядра через дифузне розташування жировидібних краплин витіснялися на периферію цитоплазми, у таких випадках вони займали ексцентричне положення. Їх розміри та форма помітно відрізнялися від більшості гепатоцитів, вони були ущільненими та лапастеподібними. Це призводило до зменшення перинуклеарного простору та каналців гранулярної ендоплазматичної сітки, що свідчило про пригнічення білоксинтезуючої функції гепатоцитів.

Отже, структурні особливості гепатоцитів, включно з кількістю органел і наявністю внутрішньоклітинних включень, є важливими показниками їхньої синтетичної та депонуючої активності, що має вирішальне значення для забезпечення життєздатності організму й адаптації до змін довкілля.

Висновки

1. Печінка строкатого товстолобика утворена трьома лопатями, має буро-червоне забарвлення, пухку консистенцію та некомпактно розташована у вентральній частині тіла між петлями кишечника: краниально межує з навколосерцевою сумкою, вентрально – обмежена передньою камерою плавального міхура, каудально – його задньою камерою.

Абсолютна маса печінки строкатого товстолобика становить $8,822 \pm 0,734$ г, відносна – $1,375\%$, її довжина дорівнює $11,808 \pm 0,432$ см, ширина – $3,402 \pm 0,194$ см.

2. Характерною ознакою печінки строкатого товстолобика є наявність гепатопанкреаса (печінки та підшлункової залози, асоційованих у єдиний орган): середня площа гепатопанкреаса становить $552,04 \pm 96,85$ мкм², площа панкреаса – $74,88 \pm 4,51$ (13,56%). Відношення площі панкреаса до загальної площі печінкової часточки становить 1 : 6,4.

3. Для строкатого товстолобика характерні трубчастий тип будови печінки та слаборозвинена міжчасточкова сполучна тканина. Середній об'єм гепатоцитів, які формують товстостінні трубочки часточок печінки, становить $4,964 \pm 0,302$ мкм³, об'єм їх ядер – $0,302 \pm 0,026$ мкм³, і, як наслідок, вони мають низьке ЯЦВ ($0,0648 \pm 0,0064$), що свідчить про їх високий морфофункціональний стан і метаболічну активність.

4. Ультрамікроскопічно гепатоцити печінки строкатого товстолобика чітко оконтуровані плазматичною мембраною, мають полігональну форму та сформовані ядра з чітко вираженими ядрцями. Васкулярні полюси сусідніх гепатоцитів, спрямовані в напрямку гемосинусоїдних капілярів, щільно контактують між собою за допомогою мікроворсинок плазмолем.

5. У цитоплазмі гепатоцитів виявляються сформовані органели загального призначення: рибосоми, гранулярна (частіше розташовані в навколоядерній і центральній зонах цитоплазми) та агранулярна ендоплазматична сітки, мітохондрії, лізосоми, комплекс Гольджі та включення – глікоген, ліпіди, вітаміни.

6. Ядра гепатоцитів, цитоплазма яких містить значну кількість жироподібних краплин, у більшості випадків унаслідок їх дифузного розташування витісняються на периферію цитоплазми та мають ексцентричне положення. При цьому спостерігається зменшення перинуклеарного простору та каналців ГЕС, що вказує на пригнічення білок синтезуючої функції гепатоцитів.

Список використаної літератури

Главачук В.А. Вплив пробіотичних препаратів на інтенсивність росту та гематологічні показники коропа. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The series: Livestock*. 2024. № 2. С. 46–55. <https://doi.org/10.32782/bsnau.lvst.2024.2.7>.

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

Дюдяєва О.А., Рутта О.В. Додаткові вимоги до продукції аквакультури на зовнішніх ринках, у тому числі в торговельних мережах ЄС. *Водні біоресурси та аквакультура*. 2021. № 2. С. 64–76. <https://doi.org/10.32851/wba.2021.2.6>.

Корженевська П.О., Шарамок Т.С., Мушит С.О. Сезонна динаміка морфо-фізіологічних показників молоді коропа лускатого (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) Таромського рибного господарства. *Рибогосподарська наука України*. 2019. № 3. С. 5–15.

Махиборода К.В. Функціонування ринку органічної продукції аквакультури в Україні та світі в контексті інноваційної економіки. *Проблеми інноваційно-інвестиційного розвитку*. 2019. № 20. С. 102–113.

Машкова К.А., Шарамок Т.С. Особливості гістологічної структури печінки карася сріблястого річки Самара (Дніпропетровська область). *Український журнал природничих наук*. 2023. № 4. С. 31–39.

Олійник О.Б. Зміни у печінці та селезінці коропів, уражених збудниками крустацеозів, під дією препаратів «Жавель-клеїд» та «Діамант». *Ветеринарна медицина*. 2017. № 103. С. 370–372.

Присяжнюк Н.М., Онищенко Л.С. Особливості морфології печінки окремих видів трирічок родини коропових. *Науково-технічний бюлетень НДЦ біобезпеки та екологічного контролю ресурсів АПК*. 2016. Т. 4. № 1. С. 198–201.

Рудь Ю.П. Молекулярна діагностика вірусних захворювань риб. *Науково-технічний бюлетень Державного науково-дослідного контрольного інституту ветеринарних препаратів та кормових добавок і Інституту біології тварин*. 2021. № 2 (22). С. 323–330. <https://doi.org/10.36359/scivp.2021-22-2.38>.

Abhijith B.D., Ramesh M., Poopal R.K. Responses of metabolic and antioxidant enzymatic activities in gill, liver and plasma of *Catla catla* during methyl parathion exposure. *The Journal of Basic & Applied Zoology*. 2016. Vol. 77. P. 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.jobaz.2015.11.002>.

Abuser S., Shtewi H. Morphological and histological structure of hepatopancreas in rock goby *Gobius paganellus* in the western coast of Libya. *Open Veterinary Journal*. 2023. Vol. 13. № 10. P. 1251. <https://doi.org/10.5455/ovj.2023.v13.i10.3>.

Al-Ghanim K.A. Effect of a synthetic pyrethroid, cypermethrin, on aminotransferases and glutamate dehydrogenase activities in gill, liver and muscles of a freshwater fish, *Cyprinus carpio*. *Pakistan Journal of Zoology*. 2014. Vol. 46. № 4. P. 997–1001.

Ali A., Wei S., Ali A., Khan I., Sun Q., Xia Q., Wang Z., Han Z., Liu Y., Liu S. Research Progress on Nutritional Value, Preservation and Processing of Fish—A Review. *Foods*. 2022. Vol. 11. № 22. P. 3669. <https://doi.org/10.3390/foods11223669>.

Atta K.I. Morphological, anatomical and histological studies on the olfactory organs and eyes of teleost fish: *Anguilla anguilla* in relation to its feeding habits. *The Journal of Basic & Applied Zoology*. 2013. Vol. 66. № 3. P. 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.jobaz.2013.10.002>.

Balakrishna Naik K. Biochemical alterations as total proteins (tp) aspartate amino transferase (AAT) and *alanine aminotransferase (ALAT) induced by permethrin and 25% ec in the fish cyprinus carpio (L.)*. *International Journal of Advanced Research*. 2024. Vol. 12. № 09. P. 1454–1463. <https://doi.org/10.21474/ijar01/19582>.

Božidar S., Marko B., Zoran Z., Vesna D. Histological methods in the assessment of different feed effects on liver and intestine of fish. *Journal of Agricultural Sciences Belgrade*. 2011. Vol. 11. № 56 (1). P. 87–100. <https://doi.org/10.2298/JAS1101087R>.

- Campos V.E.W., Pereira B.F., Pitol D.L., da Silva Alves R.M., Caetano F.H. Analysis of the liver of fish species *prochilodus lineatus* altered environments, analyzed with imagej. *Microscopy Research*. 2017. Vol. 5 (1). P. 1–9. <https://doi.org/10.4236/mr.2017.51001>.
- Carvalho M., Montero D., Torrecillas S., Castro P., Zamorano M.J., Izquierdo M. Hepatic biochemical, morphological and molecular effects of feeding microalgae and poultry oils to gilthead sea bream (*Sparus aurata*). *Aquaculture*. 2021. Vol. 532. P. 736073. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.736073>.
- Chanet B., Schnell N.K., Guintard C., Chen W.J. Anatomy of the endocrine pancreas in actinopterygian fishes and its phylogenetic implications. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. № 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49404-7>.
- Cui X., Huang X., Chen X., Li H., Wu Y., Yang Z., Liu Z., Feng R., Xu J., Wei C., Ding Z., Cheng H. Influence of Starvation on Biochemical, Physiological, Morphological, and Transcriptional Responses Associated with Glucose and Lipid Metabolism in the Liver of Javelin Goby (*Synechogobius hasta*). *Animals*. 2024. Vol. 14. № 18. P. 2734. <https://doi.org/10.3390/ani14182734>.
- Dias D., Dardengo G.M., Engrola S., Navarro-Guillén C. Characterization and comparison of the digestive physiology of two scombrids, *Katsuwonus pelamis* and *Sarda sarda*, in the Gulf of Cádiz. *PLOS ONE*. 2021. Vol. 16. № 4. P. e0249541. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249541>.
- Georgieva E. Histological and biochemical changes in liver of common carp (*Cyprinus carpio* L.) under metal exposure. *North-Western Journal of Zoology*. 2016. Vol. 12. № 2. P. 261–70.
- Glencross B. A SWOT Analysis of the Use of Marine, Grain, Terrestrial-Animal and Novel Protein Ingredients in Aquaculture Feeds. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*. 2024. P. 1–39. <https://doi.org/10.1080/23308249.2024.2315049>.
- Honcharova O. The influence of environmental factors on fish productivity in small reservoirs and transformed waters. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2021. Vol. 11. № 1. P. 176–180.
- Horalskyi L. P., Demus N. V., Sokulskyi I. M., Gutyj B. V., Kolesnik N. L., Pavliuchenko O. V., Horalska I. Y. Species specifics of morphology of the liver of the fishes of the Cyprinidae family. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2023. Vol. 14. № 2. P. 234–241. <https://doi.org/10.15421/022335>.
- Hu J.H. Explore the relationship between fish community and environmental factors by machine learning techniques. *Environmental Research*. 2020. Vol. 184. P. 109262. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109262>.
- Irm M., Taj S., Jin M., Luo J., Andriamialinirina H.J.T., Zhou Q. Effects of Replacement of Fish Meal by Poultry By-Product Meal on Growth Performance and Gene Expression Involved in Protein Metabolism for Juvenile Black Sea Bream (*Acanthoparus schlegelii*). *Aquaculture*. 2020. Vol. 528. P. 735544. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735544>.
- Jannathulla R., Rajaram V., Kalanjiam R., Ambasankar K., Muralidhar M., Dayal J.S. Fishmeal availability in the scenarios of climate change: inevitability of fishmeal replacement in aquafeeds and approaches for the utilization of plant protein sources. *Aquaculture*. 2019. Vol. 50. P. 3493–3506. <https://doi.org/10.1111/are.14324>.
- Kim H.T., Yun S.W., Park J.Y. Anatomy, ultrastructure and histology of the olfactory organ of the largemouth bass *Micropterus salmoides*, Centrarchidae. *Applied Microscopy*. 2019. Vol. 49. № 1. <https://doi.org/10.1186/s42649-019-0023-3>.
- Kukhtyn M., Malimon Z., Salata V., Rogalskyi I., Gutyj B., Kladnytska L., Kravcheniuk K., Horiuk Y. The effects of antimicrobial residues on microbiological content and the antibiotic resistance in frozen fish. *World's Veterinary Journal*. 2022. Vol. 12. № 4. P. 374–381. <https://doi.org/10.54203/scil.2022.wvj47>.
- Laktuka K., Kalnbalkite A., Sniega L., Logins K., Lauka D. Towards the Sustainable Intensification of Aquaculture: Exploring Possible Ways Forward. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. № 24. P. 16952. <https://doi.org/10.3390/su152416952>.
- Matras M., Stachnik M., Borzym E., Maj-Paluch J., Reichert M. Potential vector species of carp edema virus (CEV). *Journal of Fish Diseases*. 2019. Vol. 42. № 7. P. 959–964. <https://doi.org/10.1111/jfd.13000>.
- Maulu S. Utilizing *Clostridium autoethanogenum* for dietary protein in aquafeeds: Current progress in research and future perspectives. *Journal of Applied Aquaculture*. 2024. Vol. 37. № 1. P. 67–85. <https://doi.org/10.1080/10454438.2024.2338900>.
- Mokhtar D.M. Cellular and stromal elements organization in the liver of grass carp, *Ctenopharyngodon idella* (Cypriniformes: Cyprinidae). *Micron*. 2018. Vol. 112. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2018.06.006>.

- Payuta A.A., Flerova E.A. Dynamics of indices of metabolism in muscle tissue, liver and gonads of *Abramis brama* in different periods of the annual cycle. *Biosystems Diversity*. 2020. Vol. 28. № 2. P. 146–153. <https://doi.org/10.15421/012020>.
- Payuta A.A., Flerova E.A. Impact of habitation conditions on metabolism in the muscles, liver, and gonads of different sex and age groups of bream. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2021. Vol. 12. № 2. P. 240–250. <https://doi.org/10.15421/022133>.
- Pulido-Rodriguez L.F., Bruni L., Secci G., Moutinho S., Peres H., Petochi T., Marino G., Tibaldi E., Parisi G., Growth H., & Enzymatic A. Quality of European seabass fed on hermetia illucens and poultry by-product meal in a commercial farm. *Animals*. 2024. Vol. 14 (10). P. 1449. <https://doi.org/10.3390/ani14101449>.
- Rejane M., Vildes M. Ultra-structural and histochemical analysis of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) liver treated with fumonisin B1. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 2008. Vol. 51. № 2. P. 333–344. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132008000200013>.
- Rekha R., Surya P.N., Suyash G. Biochemical composition of the liver and muscles of cyprinid fish. *February*. 2021. № 1. P. 108–111. <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2021-1-108-111>.
- Sokulskyi I.M., Horalskyi L.P., Kolesnik N.L., Dunaievska O.F., Radzihovskyi M.L. Histostructure of the gray matter of the spinal cord in cattle (*Bos Taurus*). *Ukrainian Journal of Veterinary and Agricultural Sciences*. 2021. Vol. 4. № 3. P. 11–15. <https://doi.org/10.32718/ujvas4-3.02>.
- Sun S. Serum biochemistry, liver histology and transcriptome profiling of bighead carp *Aristichthys nobilis* following different dietary protein levels. *Fish & Shellfish Immunology*. 2019. Vol. 86. P. 832–839. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2018.12.028>.
- Szarek J. Pathomorphological Changes in the Liver of Carp (*Cyprinus carpio* L.) are Dependent on Fish Production Technology. *Journal of Comparative Pathology*. 2010. Vol. 143. № 4. P. 345. <https://doi.org/10.1016/j.jcpa.2010.09.154>.
- Taddesse F. Histological changes of liver in overfed young nile tilapia. *Journal of Fisheries and Aquatic Science*. 2014. Vol. 9 (2). P. 63–74. <https://doi.org/10.3923/jfas.2014.63.74>.
- Vicentini C.A., Franceschini-Vicentini I.B., Bombonato M.T.S., Bertolucci B., Lima S.G., Santos A.S. Morphological Study of the Liver in the Teleost *Oreochromis niloticus*. *International Journal of Morphology*. 2005. Vol. 23. № 3. <https://doi.org/10.4067/s0717-95022005000300003>.
- Vodianitskyi O. Effect of reservoir temperature and oxygen conditions on the activity of Na-K pump in embryos and larvae of perch, roach, and ruffe. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020. Vol. 10. № 2. P. 184–189.
- Wilson J.M., Castro L.F.C. Morphological diversity of the gastrointestinal tract in fishes. *Fish Physiology*. 2010. Vol. 30. P. 1–55. [https://doi.org/10.1016/S1546-5098\(10\)03001-3](https://doi.org/10.1016/S1546-5098(10)03001-3).
- Zahaby S., Hassan S., Elsheikh E. Ultramicroscopic organization of the exterior olfactory organ in *Anguilla vulgaris* in relation to its spawning migration. *Open Veterinary Journal*. 2024. Vol. 14 (1). 512 p. <https://doi.org/10.5455/ovj.2024.v14.i1.46>.
- Zhu L., Zhang Z., Chen H., Lamer J. T., Wang J., Wei W., Fu L., Tang M., Wang C., Lu G. Gut microbiomes of bigheaded carps and hybrids provide insights into invasion: A hologenome perspective. *Evolutionary Applications*. 2020. <https://doi.org/10.1111/eva.13152>.

References

- Glavatchuk, V.A. (2024). Vplyv probiotychnykh preparativ na intensyvnyy rostu ta hematolohichni pokaznyky koropa [Influence of probiotic drugs on growth intensity and hematological indicators of carp]. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Livestock*, 2, 46–55 <https://doi.org/10.32782/bsnau.lvst.2024.2.7> [in Ukrainian].
- Horalskyi, L.P., Khomych, V.T., & Kononskyi, O.I. (2019). Osnovy histolohichnoi tekhniki i morfofunktsionalni metody doslidzhennia u normi ta pry patolohii [Basics of histological technique and morphofunctional research methods in normal and pathological conditions]. *Zhytomyr : Polissia* [in Ukrainian].
- Dyudyaeva, O.A., & Rutta, O.V. (2021). Dodatkovy vymohy do produktsii akvakultury na zovnishnikh rynkakh, u tomu chysli v torhovelynykh merezhakh YES [Additional requirements for aquaculture products in foreign markets, including EU trade networks]. *Vodni bioresursy ta akvakultura* [Water Bioresources and Aquaculture], 2 (10), 64–66. <https://doi.org/10.32851/wba.2021.2.6> [in Ukrainian].
- Korzhenyeva, P., Sharamok, T., & Mushyt, S. (2019). Sezonna dynamika morfofiziologichnykh pokaznykiv molodi koropa luskatoho (*Syprinus carpio* Linnaeus, 1758) Taromskoho rybnoho

hospodarstva [Seasonal dynamics of morphological and physiological parameters of scaly carp (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) juveniles from the Taromske fish farm]. *Rybohospodarska Nauka Ukrainy [Fisheries science of Ukraine]*, 3 (49), 5–15. <https://doi.org/10.15407/fsu2019.03.005> [in Ukrainian].

Makhyboroda, K.V. (2019). Funktsionuvannia rynku orhanichnoi produktsii akvakultury v Ukraini ta sviti v konteksti innovatsiinoi ekonomiky. [Functioning of the market for organic aquaculture products in Ukraine and the world in the context of an innovative economy]. *Problemy innovatsiyno-investytsiynoho rozvytku [Problems of innovative and investment development. Series: Economics and Management]*, 20, 102–113. <https://doi.org/10.33813/2224-1213.20.2019.0> [in Ukrainian].

Mashkova, K.A., & Sharamok, T.S. (2023). Osoblyvosti histolohichnoi struktury pechinky kara-sia sribliastoho richky Samara (Dnipropetrovska oblast) [Features of the histological structure the liver of *carassius gibelio* by Samara river (Dnipropetrovsk region)]. *Ukrayinskyi zhurnal pryrodny-chykh nauk [Ukrainian Journal of Natural Sciences]*, 4, 31–39. <https://doi.org/10.32782/natural-journal.4.2023.4> [in Ukrainian].

Oliinyk, O.B., Kozii, M.S., Matviienko, N.M., & Mandyhra, M.S. (2017). Zminy u pechintsi ta selezintsi koropiv, urazhenykh zbudnykamy krustatseoziv, pid diieiu preparativ “Zhavel-Kleid” ta “Diamant” [Changes in the liver and spleen of carp affected by pathogens of crustaceans under the influence of the drugs “Zhavel-Clayd” and “Diamant”]. *Veterynarna Medytsyna [Veterinary medicine]*, 103, 370–372 [in Ukrainian].

Prysiashnyuk, N., & Onyshchenko, L. (2016). Osoblyvosti morfolohii pechinky okremykh vydiv tryrichok rodyny koropovykh [Morphology of certain types of liver in three years old carp family]. *Naukovo-tekhnichnyy byuleten NDTs biobezpeky ta ekolohichnoho kontrolyu resursiv APK [Scientific and technical bulletin of the Research Center for Biosafety and Environmental Control of Agricultural and Industrial Complex Resources]*, 4 (1), 198–201 [in Ukrainian].

Rud, Y. (2021). Molekuliarna diahnostyka virusnykh zakhvoriuvan ryb [Molecular diagnosis of viral diseases in fishes]. *Naukovo-tekhnichnyy byuleten Derzhavnoho naukovo-doslidnoho kontrol-noho instytutu veterynarnykh preparativ ta kormovykh dobavok i Instytutu biolohiyi tvaryn [Scientific and Technical Bulletin of State Scientific Research Control Institute of Veterinary Medical Products and Fodder Additives and Institute of Animal Biology]*, 22 (2), 323–330. <https://doi.org/10.36359/scivp.2021-22-2.38> [in Ukrainian].

Abhijith, B.D., Ramesh, M., & Poopal, R.K. (2016). Responses of metabolic and antioxidant enzymatic activities in gill, liver and plasma of *Catla catla* during methyl parathion exposure. *The Journal of Basic & Applied Zoology*, 77, 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.jobaz.2015.11.002> [in English].

Abuser, S.A., & Shtewi, H.H. (2023). Morphological and histological structure of hepatopancreas in rock goby *Gobius paganellus* on the western coast of Libya. *Open Veterinary Journal*, 13 (10), 1251–1258. <https://doi.org/10.5455/OVJ.2023.v13.i10.3> [in English].

Al-Ghanim, K.A. (2014). Effect of a synthetic pyrethroid, cypermethrin, on aminotransferases and glutamate dehydrogenase activities in gill, liver and muscles of a freshwater fish, *Cyprinus carpio*. *Pakistan Journal of Zoology*, 46 (4), 997–1001 [in English].

Ali, A., Wei, S., Ali, A., Khan, I., Sun, Q., Xia, Q., Wang, Z., Han, Z., Liu, Y., & Liu, S. (2022). Research progress on nutritional value, preservation and processing of fish-a review. *Foods (Basel, Switzerland)*, 11 (22), 3669. <https://doi.org/10.3390/foods11223669> [in English].

Atta, K.I. (2013). Morphological, anatomical and histological studies on the olfactory organs and eyes of teleost fish: *Anguilla anguilla* in relation to its feeding habits. *The Journal of Basic & Applied Zoology*, 66 (3), 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.jobaz.2013.10.002> [in English].

Balakrishna, R. (2024). Biochemical alterations as total proteins (TP) aspartate amino transferase (AAT) and alanine aminotransferase (ALAT) induced by permethrin and 25% ec in the fish *cyprinus carpio* (L.). *International Journal of Advanced Research*, 12 (09), 1454–1463. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/19582> [in English].

Božidar, S., Marko, B., Zoran, Z., & Vesna, D. (2011). Histological methods in the assessment of different feed effects on liver and intestine of fish. *Journal of Agricultural Sciences Belgrade*, 11, 56 (1), 87–100. <https://doi.org/10.2298/JAS1101087R> [in English].

Campos, V.E.W., Pereira, B.F., Pitol, D.L., da Silva Alves, R.M., & Caetano, F.H. (2017). Analysis of the liver of fish species *prochilodus lineatus* altered environments, analyzed with imagej. *Microscopy Research*, 5 (1), 1–9. <https://doi.org/10.4236/mr.2017.51001> [in English].

- Carvalho, M., Montero, D., Torrecillas, S., Castro, P., Zamorano, M.J., & Izquierdo, M. (2021). Hepatic biochemical, morphological and molecular effects of feeding microalgae and poultry oils to gilthead sea bream (*Sparus aurata*). *Aquaculture*, 532, 736073. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.736073> [in English].
- Chanet, B., Schnell, N.K., Guintard, C., & Chen, W.J. (2023). Anatomy of the endocrine pancreas in actinopterygian fishes and its phylogenetic implications. *Scientific Reports*, 13 (1), 22501. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49404-7> [in English].
- Cui, X., Huang, X., Chen, X., Li, H., Wu, Y., Yang, Z., Liu, Z., Feng, R., Xu, J., Wei, C., Ding, Z., & Cheng, H. (2024). Influence of starvation on biochemical, physiological, morphological, and transcriptional responses associated with glucose and lipid metabolism in the liver of javelin goby (*Synechogobius hasta*). *Animals*, 14 (18), 2734. <https://doi.org/10.3390/ani14182734> [in English].
- Dias, D., Dardengo, G.M., Engrola, S., & Navarro-Guillén, C. (2021). Characterization and comparison of the digestive physiology of two scombrids, *Katsuwonus pelamis* and *Sarda sarda*, in the Gulf of Cádiz. *PloS One*, 16 (4), e0249541. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249541> [in English].
- Georgieva, E. (2016). Histological and biochemical changes in liver of common carp (*Cyprinus carpio* L.) under metal exposure. *North-Western Journal of Zoology*, 12 (2), 261–70 [in English].
- Glencross, B. (2024). A SWOT analysis of the use of marine, grain, terrestrial-animal and novel protein ingredients in aquaculture feeds. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 32 (3), 396–434. <https://doi.org/10.1080/23308249.2024.2315049> [in English].
- Honcharova, O.V. (2021). The influence of environmental factors on fish productivity in small reservoirs and transformed waters. *Ukrainian Journal of Ecology*, 11 (1), 176–180 [in English].
- Horalskyi, L.P., Demus, N.V., Sokulskyi, I.M., Gutyj, B.V., Kolesnik, N.L., Pavliuchenko, O.V., Horalska, I.Y. (2023). Species specifics of morphology of the liver of the fishes of the Cyprinidae family. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 14 (2), 234–241. <https://doi.org/10.15421/022335> [in English].
- Hu, J.H. (2020). Explore the relationship between fish community and environmental factors by machine learning techniques. *Environmental Research*, 184, 109262. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109262> [in English].
- Irm, M., Taj, S., Jin, M., Luo, J., Andriamialinirina, H.J.T., & Zhou, Q. (2020). Effects of Replacement of Fish Meal by Poultry By-Product Meal on Growth Performance and Gene Expression Involved in Protein Metabolism for Juvenile Black Sea Bream (*Acanthoparus schlegelii*). *Aquaculture*, 528, 735544. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735544> [in English].
- Jannathulla, R., Rajaram, V., Kalanjiam, R., Ambasankar, K., Muralidhar, M., & Dayal, J.S. (2019). Fishmeal availability in the scenarios of climate change: inevitability of fishmeal replacement in aquafeeds and approaches for the utilization of plant protein sources. *Aquaculture*, 50, 3493–3506. <https://doi.org/10.1111/are.14324> [in English].
- Kim, H.T., Yun, S.W., & Park, J.Y. (2019). Anatomy, ultrastructure and histology of the olfactory organ of the largemouth bass *Micropterus salmoides*, Centrarchidae. *Applied Microscopy*, 49 (1), 18. <https://doi.org/10.1186/s42649-019-0023-3> [in English].
- Kukhtyn, M., Malimon, Z., Salata, V., Rogalskyi, I., Gutyj, B., Kladnytska, L., Kravcheniuk, K., & Horiuk, Y. (2022). The effects of antimicrobial residues on microbiological content and the antibiotic resistance in frozen fish. *World's Veterinary Journal*, 12 (4), 374–381. <https://doi.org/10.54203/scil.2022.wvj47> [in English].
- Laktuka, K., Kalnbalkite, A., Sniega, L., Logins, K., & Lauka, D. (2023). Towards the Sustainable Intensification of Aquaculture: Exploring Possible Ways Forward. *Sustainability*, 15 (24), 16952. <https://doi.org/10.3390/su152416952> [in English].
- Matras, M., Stachnik, M., Borzym, E., Maj-Paluch, J., & Reichert, M. (2019). Potential vector species of carp edema virus (CEV). *Journal of Fish Diseases*, 42 (7), 959–964. <https://doi.org/10.1111/jfd.13000> [in English].
- Maulu, S. (2024). Utilizing *Clostridium autoethanogenum* for dietary protein in aquafeeds: Current progress in research and future perspectives. *Journal of Applied Aquaculture*, 37 (1), 67–85. <https://doi.org/10.1080/10454438.2024.2338900> [in English].
- Mokhtar, D.M. (2018). Cellular and stromal elements organization in the liver of grass carp, *Ctenopharyngodon idella* (Cypriniformes: Cyprinidae). *Micron*, 112, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2018.06.006> [in English].

- Payuta, A.A., & Flerova, E.A. (2020). Dynamics of indices of metabolism in muscle tissue, liver and gonads of *Abramis brama* in different periods of the annual cycle. *Biosystems Diversity*, 28 (2), 146–153. <https://doi.org/10.15421/012020> [in English].
- Payuta, A.A., & Flerova, E.A. (2021). Impact of habitation conditions on metabolism in the muscles, liver, and gonads of different sex and age groups of bream. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 12 (2), 240–250. <https://doi.org/10.15421/022133> [in English].
- Pulido-Rodriguez, L.F., Bruni, L., Secci, G., Moutinho, S., Peres, H., Petochi, T., Marino G., Tibaldi, E., Parisi, G., Growth, H., & Enzymatic, A. (2024). Quality of European seabass fed on hermetia illucens and poultry by-product meal in a commercial farm. *Animals*, 14 (10), 1449. <https://doi.org/10.3390/ani14101449> [in English].
- Rejane, M., & Vildes, M. (2008). Ultra-structural and histochemical analysis of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) liver treated with fumonisin B1. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 51 (2), 333–344. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132008000200013> [in English].
- Rekha, R., Surya, P.N., & Suyash, G. (2021). Biochemical composition of the liver and muscles of cyprinid fish. *February*, 1, 108–111. <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2021-1-108-111> [in English].
- Sokulskyi, I.M., Horalskyi, L.P., Kolesnik, N.L., Dunaievska, O.F., Radzihovskyi, M.L. (2021). Histostructure of the gray matter of the spinal cord in cattle (*Bos Taurus*). *Ukrainian Journal of Veterinary and Agricultural Sciences*, 4 (3), 11–15. <https://doi.org/10.32718/ujvas4-3.02> [in English].
- Sun, S. (2019). Serum biochemistry, liver histology and transcriptome profiling of bighead carp *Aristichthys nobilis* following different dietary protein levels. *Fish & Shellfish Immunology*, 86, 832–839. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2018.12.028> [in English].
- Szarek, J. (2010). Pathomorphological Changes in the Liver of Carp (*Cyprinus carpio* L.) are Dependent on Fish Production Technology. *Journal of Comparative Pathology*, 143 (4), 345. <https://doi.org/10.1016/j.jcpa.2010.09.154> [in English].
- Taddesse, F. (2014). Histological changes of liver in overfed young nile tilapia. *Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 9 (2), 63–74. <https://doi.org/10.3923/jfas.2014.63.74> [in English].
- Vicentini, C.A., Franceschini-Vicentini, I.B., Bombonato, M.T.S., Bertolucci, B., Lima, S.G., & Santos, A.S. (2005). Morphological study of the liver in the teleost *Oreochromis niloticus*. *International Journal of Morphology*, 23 (3), 211–216. [in English].
- Vodianitskyi, O. (2020). Effect of reservoir temperature and oxygen conditions on the activity of Na-K pump in embryos and larvae of perch, roach, and ruffe. *Ukrainian Journal of Ecology*, 10 (2), 184–189. https://doi.org/10.15421/2020_83 [in English].
- Wilson, J.M., & Castro, L.F.C. (2010). Morphological diversity of the gastrointestinal tract in fishes. *Fish Physiology*, 30, 1–55. [https://doi.org/10.1016/S1546-5098\(10\)03001-3](https://doi.org/10.1016/S1546-5098(10)03001-3) [in English].
- Zahaby, S.A., Hassan, S.S., & Elsheikh, E.H. (2024). Ultramicroscopic organization of the exterior olfactory organ in *Anguilla vulgaris* in relation to its spawning migration. *Open Veterinary Journal*, 14 (1), 512–524. <https://doi.org/10.5455/OVJ.2024.v14.i1.46> [in English].
- Zhu, L., Zhang, Z., Chen, H., Lamer, J. T., Wang, J., Wei, W., Fu, L., Tang, M., Wang, C., & Lu, G. (2020). Gut microbiomes of bigheaded carps and hybrids provide insights into invasion: A holocene perspective. *Evolutionary applications*, 14 (3), 735–745. <https://doi.org/10.1111/eva.13152> [in English].

Отримано: 21.04.2025
Прийнято: 15.05.2025



УДК 591.424:597.551.4
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.3>

ГІСТОМОРФОЛОГІЯ ЛЕГЕНЬ КЛАРІЄВОГО СОМА (*CLARIAS GARIEPINUS*)

А. П. Горальський¹, І. В. Цанько², Б. В. Гутий³, Н. А. Колеснік⁴

Важливе значення у життєдіяльності живих організмів для їх існування є забезпечення клітин та тканин киснем й поживними речовинами та виведення продуктів обміну речовин. Відповідь організму на вплив навколишнього середовища, що об'єднує всі органи та системи в єдине ціле, потребує злагодженої морфофункціональної діяльності всіх його систем, зокрема органів дихання.

Саме це й стало метою проведених досліджень.

За використання макро- та мікроскопічних, морфометричних і статистичних методів досліджень представлено результати щодо мікроскопічної будови легень кларієвого сома. Так, у системі газообміну дводихальних риб, представником яких є кларієвий сом, у процесі їх філогенетичного розвитку відбуваються зміни (формується два кола кровообігу), які характерні для земноводних тварин, у яких, окрім зябер, формуються ще й парні легені, завдяки чому тварини можуть дихати атмосферним повітрям.

Легені кларієвого сома сформовані з розгалужених анатомічних структур, розташованих на другій та четвертій зябрових дугах. Це парні морфологічні структури блідо-рожевого кольору з комірчастими стінками, які сполучені зі стравоходом. Права і ліва легені утворені медіальною та латеральною частками: беручи початок від зябрових порожнин, головний стовбур медіальної частки легень деревоподібно розгалужується на чотири великі гілки, які діляться на середні, малі,

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

² аспірант кафедри зоології, біологічного моніторингу та охорони природи
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: ivanc9298@gmail.com
ORCID: 0009-0002-8416-5672

³ доктор ветеринарних наук, професор, завідувач кафедри гігієни,
санітарії та загальної ветеринарної профілактики імені М. В. Демчука
(Львівський національний університет ветеринарної медицини та
біотехнологій імені С. З. Гжицького, м. Львів)
e-mail: bvh@ukr.net
ORCID: 0000-0002-5971-8776

⁴ кандидат ветеринарних наук, доцент,
доцент кафедри внутрішньої патології та морфології
(Поліський національний університет, м. Житомир)
e-mail: natacha_kolesnik@ukr.net
ORCID: 0000-0001-7741-87530

віддаючи початок товстостінним міхурцям. Латеральна частка легень починається окремим стовбуром, який не поєднаний із медіальною часткою легень.

Легені кларієвого сома вкриті сполучнотканинною оболонкою (плеврою), яка мікроскопічно сформована трьома шарами: зовнішнім, середнім, внутрішнім. Мікроскопічна будова стінки бронхів легень побудована з трьох оболонок – зовнішньої, середньої (м'язової) та внутрішньої: поверхня стінки зовнішньої оболонки сформована епітеліальними клітинами, які формують видовженої форми ворсинки, власна пластинка оболонки утворена пухкою сполучною тканиною, у якій розташована мережа кровоносних судин; м'язова оболонка стінки утворена поперечно посмугованою м'язовою тканиною, волокна якої мають поздовжній напрямок; внутрішня оболонка тоненька та сформована видовженої форми епітеліальними клітинами. Порожнина бронхів на всьому проміжку бронхіального дерева, аж до легеневих міхурців, заповнена ретикулярною тканиною.

Згідно з морфометричними дослідженнями, найбільші морфометричні параметри (товщина стінки, товщина порожнини бронхів) характерні для великих, потім для середніх та відповідно малих бронхів. Легеневі міхурці мають округлу форму, мікроскопічно у їх стінці сполучнотканинної оболонки виявляється значна мережа судин (капілярів) мікроциркуляторного русла. Середній об'єм легеневих міхурців дорівнює $94\,770 \pm 909$ тис. мкм^3 , середній об'єм порожнини міхурців, заповненої ретикулярною тканиною, становить $27\,862 \pm 413$ тис. мкм^3 . За таких показників відношення об'єму порожнини міхурця до об'єму його стінки становить 0,4164.

Ключові слова: хребетні тварини, легені, морфологія, гістологічна будова, морфометрія.

LUNGS HISTOMORPHOLOGY OF THE CLARII CATFISH (CLARIAS GARIEPINUS)

L. P. Horalskyi, I. V. Tsanko, B. V. Gutyj, N. L. Kolesnik

The vital activity of living organisms for their existence is essential for providing cells and tissues with oxygen and nutrients and the excretion of metabolic products. The body's response to environmental influences, uniting all organs and systems into a single whole, requires the regular morphofunctional activity of all body systems, including the respiratory system, which served as the purpose of the research.

Using macro- and microscopic, morphometric, and statistical research methods, the results are presented on the microscopic structure of the gills of the Clarius catfish. Thus, in the gas exchange system of birefringent fish, represented by the Clarius catfish, changes occur in the process of their phylogenetic development (two circles of blood circulation are formed), which are characteristic of amphibians, in which, in addition to gills, paired lungs are also formed, thanks to which animals can breathe atmospheric air.

The gills of the Clarius catfish are formed by branched anatomical structures located on the second and fourth-gill arches. These are paired pale pink morphological structures with cellular walls connected to the esophagus. The medial and lateral lobes form the right and left lungs: starting from the gill cavities, the main trunk of the medial lobe of the lungs branches out like a tree into four large branches, which are divided into medium, small, giving rise to thick-walled alveoli. The lateral lobe of the lungs begins with a separate trunk that is not connected to the medial lobe of the lungs.

The lungs of the Claria catfish are covered with a connective tissue membrane (pleura), which is microscopically formed by three layers: outer, middle, and inner. The microscopic structure of the wall of the bronchi of the lungs is built of three membranes – outer, middle (muscular), and inner: the surface of the wall of the outer membrane is formed by epithelial cells that form elongated villi, the lamina propria of the membrane is formed by loose connective tissue, in which a network of blood vessels is located; the muscular membrane of the wall is formed by transversely striated muscle tissue, the fibers of which have a longitudinal direction; the inner membrane is thin and formed by elongated epithelial cells. The cavity of the bronchi, throughout the entire interval of the bronchial tree, ending in the pulmonary alveoli, is filled with reticular tissue.

According to morphometric studies, the most prominent morphometric parameters (wall thickness, thickness of the bronchial cavity) are characteristic of large, then medium, and, accordingly, small bronchi. Pulmonary alveoli have a rounded shape; microscopically, a significant network of vessels (capillaries) of the microcirculatory bed is detected in the wall of the connective tissue membrane. The average volume of pulmonary alveoli is $94\,770 \pm 909$ thousand. mcm^3 , the average volume of the alveoli cavity, filled with reticular tissue, is $27\,862 \pm 413$ thousand. mcm^3 . With such indicators, the ratio of the volume of the alveoli cavity to the volume of its wall is 0.4164.

Key words: vertebrates; lungs morphology; histological structure; morphometry.

Вступ

Важливим джерелом забезпечення населення планети харчовою продукцією тваринництва є біологічні ресурси гідросфери, до яких належить рибна промисловість. Останнім часом об'єм виробництва водних біоресурсів, зокрема рибних продуктів, у світі та в Україні забезпечується не тільки промислом, але й інтенсивним розвитком аквакультури.

Аквакультура – найбільш швидко-зростаючий сектор тваринництва і, мабуть, один із найбільш важливих секторів глобальної продовольчої системи. Її значення у забезпеченні людства продуктами харчування невіддільно зростає. На сьогодні розвиток прісноводної аквакультури є однією з пріоритетних напрямів галузі харчової промисловості. Вона базується на теоретичних основах використання в аквакультурі цінних гідробіонтів з урахуванням вирощування їх у водних екосистемах з метою підвищення їх продуктивності та якості продуктів харчування. Це можливо лише за розвитку та запровадження у тваринництві, зокрема в галузі рибного господарства, новітніх технологій.

При цьому важливе значення має вирощування кларієвого сома у зв'язку з його біологічними особливостями розвитку та росту (Juin et al., 2017; Lawal et al., 2017; Strauch et al., 2018), а саме: невибагливість до умов утримання у водному середовищі; щільність посадки; всеїдність; несприятливість до захворювань; швидкі темпи росту, що має важливе економічне значення щодо собівартості виробництва рибної продукції (Baßmann et al., 2017; Ukagwu et al., 2017; Zadorozhnii & Bekh, 2024).

Африканський кларієвий сом (*Clarias gariepinus*) у природі зустрічається по всій Африці, мешкаючи в прісноводних озерах, болотах, гирлах річок, у самих річках, зрошувальних каналах, ставках, заплавах водоймах, навіть якщо такі періодично висихають (Hecht et al., 1996; Hildebrand et al., 2023). Це дводишна, всеїдна, прісноводна та теплолюбна тварина, яка, крім зябрового дихання, може дихати і атмосферним повітрям (Chervinski, 1984; Britz & Hecht, 1987; Царик та ін., 2018). Для вирощування сома мають бути відповідні умови його вирощування й утримання: відповідна температура води (20–30 °C), її хімічний склад, рівень кисню, солоності тощо (Clay, 1977; Hogendorn & Vismans, 1980; Huisman & Richter, 1987).

Не викликає сумніву, що запровадження науково-інноваційних технологій і сучасних методів вирощування риби надасть можливість підвищити ефективність виробництва рибної продукції, забезпечити сталість та екологічну безпеку процесів технології виробництва та знизити витрати на ресурси, зберігаючи при цьому високу якість продукції.

Водночас застосування новітніх технологій у виробничих процесах галузі рибництва (стресові чинники, невідповідність температурного режиму водного середовища, хімічний і фізичний склад води тощо) впливає на морфофункціональний стан органів і систем організму риб під час їх вирощування (Rudenko et al., 2019; Honcharova et al., 2021). Одним із важливих факторів, які впливають на продуктивні якості тварин, є застосування новітніх технологій годівлі риб комбінованими кормами з метою забезпечення життєвих потреб тварин в енергії та поживних і біологічно активних речовинах. Це призводить до порушення гомеостазу в організмі риб і сприяє появі нових захворювань різного генезу. До того ж за впливу різних технологічних, стресових, несприятливих чинників внутрішнього та зовнішнього середовища із застосуванням новітніх технологій у галузі рибництва в організмі виникають метаболічні порушення, що негативно впливає на їх продуктивність, формування імунітету тощо (Kofonov et al., 2020; Kukhtyn et al., 2022; Horalskyi et al., 2023).

Саме тому для успішного розвитку галузі рибництва, покращення якості продукції, профілактики та діагностики хвороб доцільно проводити одночасно з організаційно-господарськими заходами поглиблене дослідження організму на макро- та мікроскопічному рівнях. У цьому контексті особливої актуальності набуває дослідження особливостей органів дихання, зокрема легень, у віковому, породному та видовому аспектах, а також за умов впливу на організм антропогенних чинників довкілля (Горальський та ін., 2015; Horalskyi et al., 2020; Horalskyi et al., 2022a).

У всіх наземних хребетних до складу органів дихання входять повітряноносні шляхи та легені, які виконують в організмі важливі життєві функції. У риб дихання відбувається за допомогою зябер, проте у дводишних, зокрема у кларієвого сома, поряд із зябровим диханням функціонує й легеневе, що стало можливим завдяки появі легень у процесі філогенетичного розвитку, зав-

дяки чому ці риби здатні дихати атмосферним повітрям (Алексієнко, 2007; Мельник та ін., 2008; Шерман та ін., 2009; Царик та ін., 2018).

З появою легень у кларієвого сома для нього стали характерними індивідуальні особливості морфологічної будови органів дихання, що й зумовило мету нашого дослідження. Уперше було проведено вивчення гістоархітекτονіки легень у дводишних риб на прикладі кларієвого сома.

Матеріал і методи

Дослідження проводили згідно з правилами до міжнародних засад «Європейської конвенції щодо захисту хребетних тварин, які використовують в експерименті та інших наукових цілях» (Страсбург, 1986 р.) та «Правил проведення робіт з використанням експериментальних тварин», затверджених наказом МОЗ № 281 від 1 листопада 2000 р. «Про заходи щодо подальшого удосконалення організаційних форм роботи з використанням експериментальних тварин» та відповідного Закону України «Про захист тварин від жорстокого поводження» (№ 3447-IV від 21.02.2006, м. Київ).

Вирощували й утримували кларієвих сомів для досліджень у домашніх умовах (басейнах), використовуючи для цього штучно створені екосистеми зі сприятливими умовами для їх проживання, дотримуючись відповідного температурного режиму води, відповідних показників її солоності та кислотності. Водопровідну воду, яка була джерелом водопостачання, попередньо відстоювали, прогрівали до температури басейну й щодобово в кількості 10 % від загальної ємкості додавали у басейн. Приміщення, де розташовані басейни, були затемнені.

Об'єктом дослідження були легені дводишних хребетних (Chordata), класу променеперих (Actinopterygii), родини кларієвих (Clariidae), виду кларій нільський (*Clarias gariepinus*), представником якого є кларієвий сом ($n = 5$). Для дослідження використовували анатомічні, гістологічні, морфометричні та статистичні методи досліджень.

Клінічну оцінку риби проводили шляхом візуального щодобового огляду риби, враховуючи її активність, рухливість, апетит тощо. Експериментальні дослідження проводились на кафедрі зоології, біологічного моніторингу та охорони природи Житомирського державного університету імені Івана Франка відповідно до науково-дослідної тематики кафедри: «Тварини штучних і природних

екосистем України» (державний реєстраційний номер – 0122U002270).

Клінічний огляд щойно виловленої риби включав оцінку екстер'єрних (зовнішній вигляд, маса тіла) та інтер'єрних (лінійні параметри, абсолютна та відносна маса органа) параметрів, після анатомічного розтину дослідження проводили згідно з рекомендаціями іхтіологічних та морфологічних (Horalskyi et al., 2019) посібників. Для запобігання негативного впливу стрес-чинників рибу перед розтином присипляли розчином гіпнодilu (5–10 мл/л).

Для виконання гістологічних досліджень використовували загальноприйняті методи фіксації матеріалу та виготовлення гістологічних зрізів (Horalskyi et al., 2019). Для цього відібрані шматочки легень протягом однієї доби та більше фіксували у 12%-му охолоджену розчині нейтрального формаліну з подільшою заливкою матеріалу в парафін за схемами, запропонованими в посібнику (Horalskyi et al., 2019).

Для виготовлення парафінових зрізів використовували санний мікротом МС-2. Товщина гістозрізів не перевищувала 10–12 мкм.

Для дослідження мікроскопічної будови клітин і тканин гістологічні зрізи після їх депарафінації зафарбовували гематоксиліном (Diapath, Італія, 2020) та еозинном (LeicaGeosystems, Німеччина, 2020). Виготовлені гістопрепарати використовували для визначення характеристики гісто-та цитоархітекτονіки органів і проведення морфометричних досліджень.

Гістометрію (товщина, діаметр) структурних елементів проводили за світлової мікроскопії, використовуючи мікроскопи Micros (Micros, Австрія, 2012), згідно з рекомендаціями, запропонованими в посібнику (Horalskyi et al., 2019). Фотографування мікроскопічної будови легень здійснювали відеокамерою CAM V-200 (ІнтерМед, КНР, 2017), вмонтованою у мікроскоп.

Визначення об'єму легневих міхурців та їх порожнин, заповнених ретикулярною тканиною, здійснювали за формулою: об'єм міхурця = $3,14 / 6 \times \text{довжина міхурця (порожнини)} \times \text{ширина міхурця (порожнини)}^2$.

Визначення відношення об'єму порожнини міхурця до об'єму його стінки, здійснювали шляхом дії ділення величини об'єму порожнини міхурця на величину різниці об'єму міхурця та його порожнини.

Морфологічну термінологію структурних частин легень подано згідно з Міжнародною

ветеринарною анатомічною номенклатурою та Міжнародною ветеринарною гістологічною номенклатурою.

Цифрова обробка результатів досліджень проведена статистично з використанням програмного пакета Statistica 7.0 програмного забезпечення (StatSoft, Талса, США). Відмінності між величинами визначали за допомогою ANOVA, де відмінності вважалися достовірними, якщо $P < 0.05$ (з урахуванням похибки Бонферроні).

Результати

У кларієвого сома, який є представником дводишних риб, окрім зябрового дихання, наявне і легеневе. Саме тому в цього виду риб, крім зябер, у процесі їх філогенетичного розвитку формується додатковий орган дихання – легені. А отже, для кларієвого сома характерним є два кола кровообігу: велике (соматичне) та мале (легеневе) коло кровообігу.

За результатами наших досліджень рух крові у великому колі кровообігу починається зі шлуночка серця, з якого кров потрапляє в артеріальний конус, звідти через аорту, по вихідних зябрових артеріях рухається до зябер, де насичується киснем, і вже оксигенована кров по зябровим артеріальним судинам потрапляє в органи та тканини, там відбувається газообмін, і вже дезоксигенована кров по зябрових венах потрапляє в праву частину передсердя.

Рух крові в малому колі кровообігу бере початок зі шлуночка серця, звідти потрапляє до артеріального конуса та по черевній аорті, по вихідних легеневих артеріях надходить до легень. У легенях відбувається газообмін, і вже насичена киснем кров по легеневих венах надходить у ліву половинку передсердя. Потім із передсердя кров знову потрапляє у шлуночок, звідки вже частково змішана кров надходить у артеріальний конус, з якого по легеневих і зябрових артеріях знову потрапляє до зябер і легень, де відбувається газообмін.

Легені у кларієвого сома блідо-рожевого кольору. Це парний орган, який побудований із правої та лівої легень, що беруть початок від зябрових порожнин, прикріплюючись до задньої частини зябрових дуг (рис. 1). Топографічно легені кларієвого сома розташовані у правій та лівій половині краніальної частини тулуба, відповідно з боків середостіння, і локалізовані у сформованих правій та лівій навколозябрових порожнинах. Обидві легені вентрально розташовані у основи глотки по обидва боки

стравоходу, поєднуючись із ним відповідними повітроносними шляхами, формуючи таким чином орган повітряного дихання (рис. 2).

За морфологічною будовою це комірчасті парні анатомічні структури, обплетені густою мережею кровоносних судин, капілярів, у яких відбувається газообмін, капілярна сітка яких поєднана з останньою парою зябрових артерій. Кожна (права та ліва) легень складається з медіальної (великої) та латеральної (малої) часток (див. рис. 2). Медіальні частки правої та лівої легень топографічно розташовані в краніальній частині тулуба, відповідно праворуч і ліворуч від стравоходу. До їх дорсальних поверхонь примикають латеральні частки, які латерально прилягають до зябрових (четвертих) дуг, контактуючи при цьому із зябровими кришечками. Латеральна частка легень краніально граничить із зябровими дугами.

На легенях виділяють дорсальну (спрямовану до дорсальної частини тулуба), вентральну (спрямовану до вентральної частини тулуба) та середостінну (спрямовану до середостіння) поверхні. Макроскопічно на легенях диференціюють краніальний, каудальний і латеральний краї.

Морфологічно кожна легень у кларієвого сома, починаючи свій напрямок від зябрових дуг у вигляді стовбура, деревоподібно

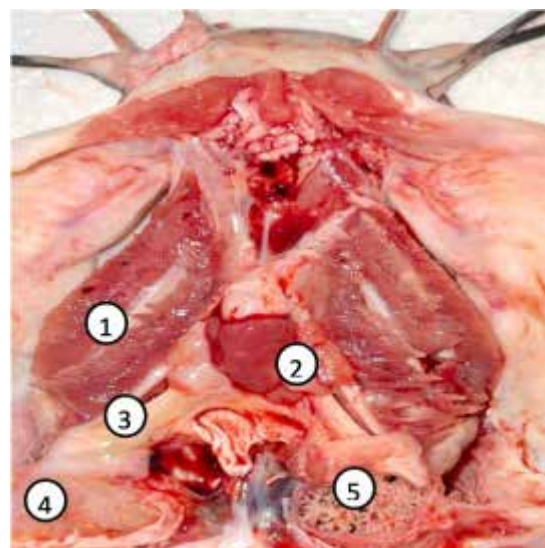


Рис. 1. Морфотопографія легень
(краніальна частина тулуба)
кларієвого сома:

1 – зябра; 2 – серце; 3 – кістки плечового
посла; 4 – ліва легень (покрита плеврою);
5 – права легень. Макропрепарат

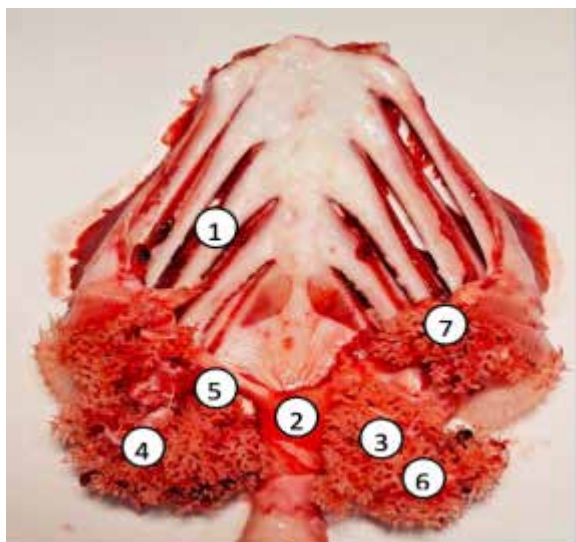


Рис. 2. Морфологія легень кларієвого сома:
1 – зяброві дуги; 2 – стравохід; 3 – ліва
легеня; 4 – права легеня; 5 – поєднання
легень зі стравоходом; 6 – медіальна
частка легені; 7 – латеральна частка легені.
Макропрепарат

(кущоподібно) розгалужується, утворюючи подібні структури на зразок бронхіального дерева, як у ссавців: головна гілка (стовбур) медіальної частки легені розгалужується на чотири (рис. 3) великі гілки, великі – на середні, які галузяться відповідно на малі гілки, формуючи деревоподібну структуру. Латеральна частка легень починається окремим стовбуром, який не поєднаний із медіальною часткою легень. Потім малі гілки бронхіального дерева кожної легені

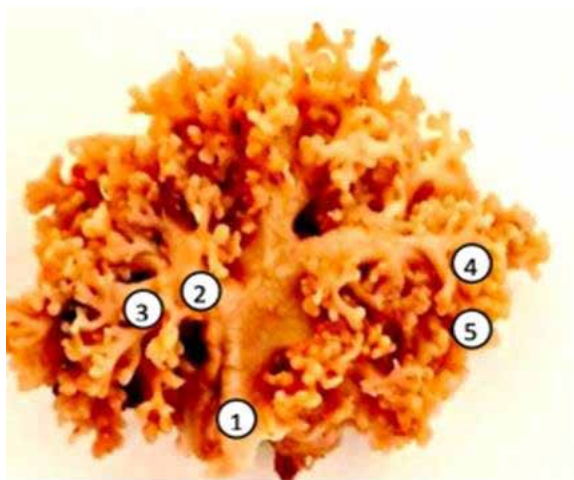


Рис. 3. Медіальна частка легені:
а – основний стовбур; 1 – головна гілка;
2 – велика гілка; 3 – середня гілка; 4 – мала
гілка; 5 – міхурці. Макропрепарат

галузяться на окремі гілочки, які віддають початок сформованим товстостінним міхурцям (рис. 4).

Кожна легеня у кларієвого сома покрита сполучнотканинною оболонкою (плеврою), середня товщина якої становить $552,6 \pm 7,86$ мкм. За мікроскопічної будови сполучнотканинна оболонка складається з трьох шарів: зовнішнього, середнього та внутрішнього. Зовнішній шар оболонки сформований епітелієм, який, вп'ячуючись у глибину оболонки, утворює видовжені залозисті структури у вигляді крипти, схожі за будовою на залозисті утворення (рис. 5). На поздовжньому зрізі такі залозисті структури мають округло-овальну форму. Вони утворені призматичної форми клітинами, які формують листочки першого порядку, останні, зі свого боку, поділяються на листочки другого порядку (рис. 6). Між епітеліоцитами зустрічаються клітини крові – еритроцити та лейкоцити. У просвіті залоз і навколо них розташована мережа дрібних кровоносних капілярів, у яких присутні клітини крові.

Середній шар сполучнотканинної оболонки (плеври) утворений пухкою сполучною тканиною, де розташовані судини гемомікроцикуляторного русла – артеріоли, венули, капіляри (див. рис. 5). Внутрішній шар оболонки найтонший, він сформований полігональної форми витягнутими в довжину клітинами.

Гістологічна будова бронхіального дерева легень кларієвого сома має певні особли-



Рис. 4. Галуження бронхів легень кларієвого сома: 1 – стовбур середнього бронха;
2 – біфуркація; 3 – стовбур малого бронха;
4 – міхурці; 5 – стінка бронха;
6 – ретикулярна тканина порожнини
бронха. Гематоксилін та еозин
(тотальний зріз). X 20

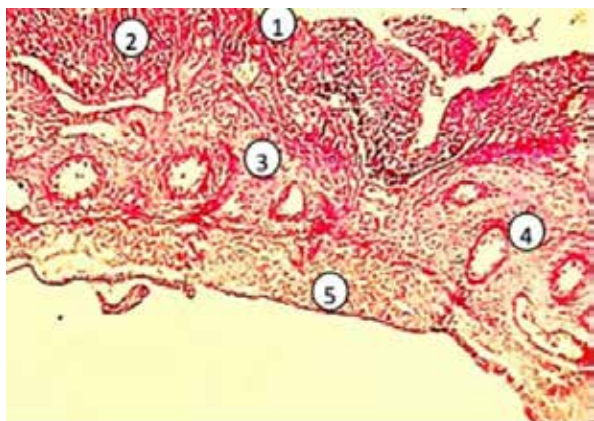


Рис. 5. Мікроскопічна будова сполучнотканинної оболонки (плеври) легень: 1 – епітеліальний шар; 2 – залозисті структури; 3 – середній шар; 4 – судини мікроциркуляторного русла; 5 – внутрішній шар. Гематоксилін та еозин. X 70

вості порівняно з мікроскопічною будовою легень ссавців. Так, мікроскопічна будова стінки бронхів (великих, середніх малих) легень кларієвого сома складається з трьох оболонок: зовнішньої, середньої та внутрішньої (рис. 7–10).

Поверхня зовнішньої оболонки стінки бронхів сформована призматичними епітеліоцитами, які, вп'ячуючись у її глибину, формують вертикально видовжені ворсинки. Після епітеліального шару розташована власна пластинка, сформована пухкою сполучною тканиною, у якій виявляються мережа судин мікроциркуляторного русла:

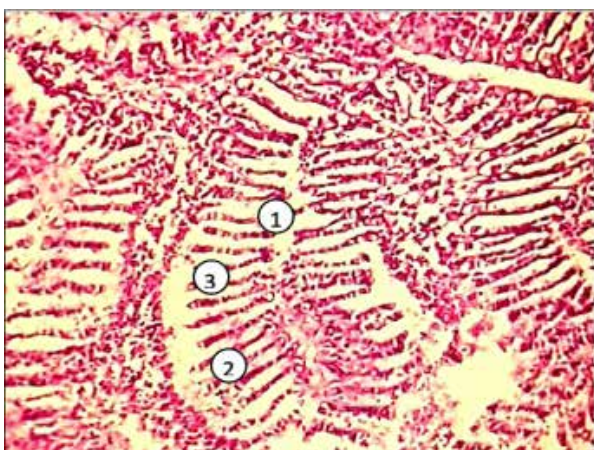


Рис. 6. Фрагмент мікроскопічної будови сполучнотканинної оболонки стінки бронхів: 1 – залозисті структури; 2 – листочки першого порядку; 3 – листочки другого порядку. Гематоксилін та еозин. X 150

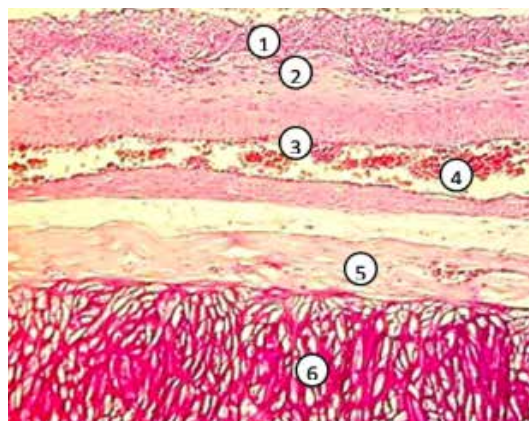


Рис. 7. Фрагмент мікроскопічної будови великого бронха легень кларієвого сома: 1 – зовнішня оболонка стінки; 2 – пухка сполучна тканина; 3 – кровоносна судина; 4 – просвіт судини; 5 – м'язова оболонка стінки; 6 – ретикулярна тканина. Гематоксилін та еозин. X 100



Рис. 8. Мікроскопічна будова середнього бронха легень кларієвого сома: 1 – зовнішня оболонка стінки; 2 – пухка сполучна тканина; 3 – кровоносна судина; 4 – м'язова оболонка стінки; 5 – просвіт бронха, поповнений ретикулярною тканиною. Гематоксилін та еозин. X 80

артеріоли, венули, капіляри та великі судини (артерії, вени), галуження яких відбувається в поздовжньому напрямку бронхіального дерева, по яких тече артеріальна та венозна кров у малому (легеневому) колі кровообігу (рис. 7–10).

Середня (м'язова) оболонка стінки бронхів сильно розвинута, вона сформована з поперечно посмугованої м'язової тканини, волокна яких мають поздовжній напрямок (рис. 9). Їх м'язові волокна мають різну товщину: великі, середні й малі. Між воло-



Рис. 9. Фрагмент мікроскопічної будови стінки середнього бронха легень кларієвого сома: 1 – м'язова оболонка; 2 – міжм'язова сполучна тканина; 3 – кровоносна судина; 4 – м'язові волокна; 5 – анастомози; 6 – ядра м'язових волокон; 7 – ретикулярна тканина. Гематоксилін та еозин. X 400

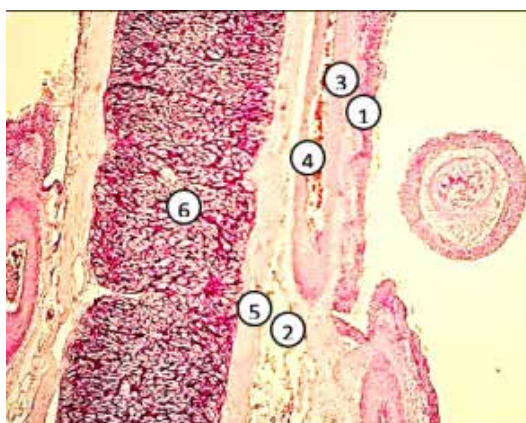


Рис. 10. Мікроскопічна будова середнього бронха легень кларієвого сома:
1 – зовнішня оболонка стінки бронха;
2 – пухка сполучна тканина; 3 – кровоносна судина; 4 – просвіт судини; 5 – м'язова оболонка стінки бронха; 6 – просвіт бронха, поповнений ретикулярною тканиною.
Гематоксилін та еозин. X 80

кнами розташована міжм'язова сполучна тканина. Ядра м'язових волокон розташовані на периферії самих волокон (рис. 9).

Внутрішня оболонка стінки бронхів утворена надзвичайно тонким непомітним шаром, сформованим видовженої форми епітеліальними клітинами, який внутрішньо контактує з ретикулярною тканиною, яка заповнює порожнину бронхів.

Легеневі міхурці на поперечному зрізі мають округлу форму. Їх стінка побудована за таким самим принципом, як у бронхів

(рис. 11–13). Проте у їх стінці сполучнотканинної оболонки виявляється значна мережа судин (капілярів) мікроциркуляторного русла (рис. 13), можливо, саме там відбувається газообмін, де кисень шляхом дифузії крізь стінки міхурців і кровоносних капілярів із повітря переходить у кров, а вуглекислий газ із крові потрапляє у судини.

У кларієвого сома просвіт бронхів на всьому проміжку бронхіального дерева, аж до легеневих міхурців, заповнений ретикулярною тканиною.

Її ретикулярні клітини разом із ретикулярними волокнами, які переплітаються між собою, формують сітчастий, підтримуючий каркас (основу) порожнини бронхіаль-



Рис. 11. Мікроскопічна будова легеневого міхурця кларієвого сома: 1 – міхурець; 2 – фрагмент малого бронха; 3 – місце галуження малого бронха в міхурець.
Гематоксилін та еозин. X 120



Рис. 12. Мікроскопічна будова легеневого міхурця кларієвого сома: 1 – міхурець; 2 – зовнішня оболонка стінки; 3 – пухка сполучна тканина; 4 – м'язова оболонка стінки; 5 – просвіт міхурця, заповнений ретикулярною тканиною. Гематоксилін та еозин. X 150



Рис. 13. Мікроскопічна будова легеневого міхурця кларієвого сома: 1 – зовнішня оболонка стінки; 2 – пухка сполучна тканина; 3 – мережа капілярів; 4 – м'язова оболонка стінки; 5 – просвіт міхурця, заповнений ретикулярною тканиною. Гематоксилін та еозин. X 280

ного дерева, починаючи з великих бронхів і закінчуючись у легневих міхурцях, займаючи їх порожнину (рис. 14). Завдяки такій унікальній будові бронхіального дерева бронхи у кларієвого сома не спадаються.

За результатами виконаних нами гістометричних досліджень бронхіального дерева легень кларієвого сома, товщина великих бронхів становить 1701 ± 31 мкм. Товщина їх стінки дорівнює 402 ± 15 мкм: товщина зовнішньої оболонки – 221 ± 9 мкм, середньої оболонки – 169 ± 6 мкм, внутрішньої оболонки – $8,8 \pm 0,3$ мкм. При цьому товщина порожнини бронха, заповненої ретикулярною тканиною, дорівнює 903 ± 17 мкм (табл. 1).

Показники структурних компонентів середніх бронхів є достовірно ($P < 0,05$) меншими порівняно з такими показниками

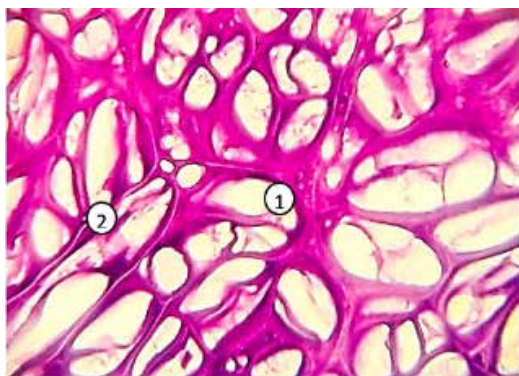


Рис. 14. Ретикулярна тканина у порожнині бронхів легень кларієвого сома: 1 – ретикулярна клітина; 2 – ретикулярні волокна. Гематоксилін та еозин. X 400

у великих бронхів (табл. 1). Так, товщина середніх за величиною бронхів легень становить 1299 ± 17 мкм, відповідно товщина їх стінки дорівнює 313 ± 11 мкм: зовнішньої оболонки – 174 ± 6 мкм, середньої оболонки – 132 ± 5 , внутрішньої оболонки – $6,8 \pm 0,3$. Товщина порожнини у таких бронхів становить 678 ± 12 мкм.

Аналогічні морфометричні зміни в бік достовірного зменшення виявили і для морфометричних параметрів малих бронхів порівняно з такими показниками у середніх ($P < 0,05$) бронхів. При цьому товщина малих бронхів легень дорівнює $600,2 \pm 9,97$ мкм, відповідно товщина стінки дорівнює 163 ± 5 мкм. За таких морфометричних параметрів товщина зовнішньої оболонки стінки малих бронхів дорівнює 105 ± 3 мкм, товщина середньої оболонки – 52 ± 1 мкм, товщина внутрішньої оболонки – $4,0 \pm 0,2$ мкм. При цьому товщина порожнини бронха, заповненої ретикулярною тканиною, дорівнює 313 ± 11 мкм (табл. 1).

Діаметр міхурців легень кларієвого сома становить 625 ± 11 мкм. Діаметр порожнини міхурця, заповненої ретикулярною тканиною, – 393 ± 8 мкм. Товщина стінки легневих міхурців дорівнює 186 ± 7 : товщина зовнішньої оболонки – 118 ± 3 , товщина середньої оболонки – $59,5 \pm 1,4$, товщина внутрішньої оболонки – $4,17 \pm 0,18$ (табл. 1). Середній об'єм легневих міхурців дорівнює $94\,770 \pm 909$ мкм³, середній об'єм порожнини – $27\,862 \pm 413$ мкм³. Відношення об'єму порожнини міхурця до об'єму його стінки становить $0,4164$ (табл. 2).

Отже, у процесі філогенетичного розвитку кларієвого сома, який є представником дво-дишних риб, у будові органів дихання відбуваються певні зміни дихальної системи, яка забезпечують газообмін між організмом тварини та навколишнім середовищем. Це проявляється вдосконаленням будови апарату дихання, де, крім зябер, формуються ще і парні легені, завдяки чому тварини можуть дихати атмосферним повітрям.

Як свідчать результати проведених нами морфологічних досліджень, легені кларієвого сома за макро- та мікроскопічною будовою відрізняються від легень хребетних тварин класів амфібій, плазунів, птахів і ссавців.

Обговорення

Органами дихання кісткових риб є зябра. До того ж до 10% газообміну в риб відбувається через шкіру. Крім того, у газообміні можуть брати участь окремі частини

Таблиця 1

Морфометрія структурних компонентів бронхіального дерева легенів кларієвого сома (M ± m)

Морфометричні показники	Структурні компоненти бронхіального дерева		
	Великі бронхи	Середні бронхи	Малі бронхи
Товщина бронха, мкм	1701 ± 31	1299 ± 17	600 ± 10
Товщина порожнини бронха, мкм	903 ± 17	678 ± 12	313 ± 11
Товщина стінки бронха, мкм	402 ± 15	313 ± 9	163 ± 5
Товщина зовнішньої оболонки стінки бронха, мкм	221 ± 9	174 ± 6	105 ± 3
Товщина середньої оболонки стінки бронха, мкм	169 ± 6	132 ± 5	52 ± 1
Товщина внутрішньої оболонки стінки бронха, мкм	8,8 ± 0,3	6,8 ± 0,3	4,0 ± 0,2

Таблиця 2

Морфометрія структурних компонентів легеневих міхурців кларієвого сома (M ± m)

Морфометричні показники	Цифрові значення
Товщина стінки сполучнотканинної оболонки (плеври) легень, мкм	553 ± 8
Діаметр легеневого міхурця, мкм	625 ± 11
Діаметр порожнини, заповненої ретикулярною тканиною, мкм	393 ± 8
Товщина стінки міхурця, мкм	186 ± 7
Товщина зовнішньої оболонки стінки, мкм	118 ± 3
Товщина середньої оболонки стінки, мкм	59,5 ± 1,4
Товщина внутрішньої оболонки стінки, мкм	4,17 ± 0,18
Середній об'єм легеневого міхурця, тис. мкм ³	94770 ± 909
Середній об'єм порожнини міхурця, заповненої ретикулярною тканиною, тис. мкм ³	27862 ± 413
Відношення об'єму порожнини міхурця до об'єму його стінки	0,4164

кишечника та плавальний міхур (DeLaney et al., 1983; Мельник та ін., 2008; Huang et al., 2008).

Для дводишних риб, представником яких є кларієвий сом, окрім зябрового дихання, характерне також і легеневе. При цьому плавальний міхур комірчастої будови перебудовується у дві легені, які за потреби виконують функцію дихання атмосферним повітрям (Da Silva et al., 2017; Царик та ін., 2018). Згідно з дослідженнями, легені для життєдіяльності кларієвого сома мають важливіше значення, ніж зябра.

До того ж легеневе дихання у кларієвого сома, у якого, крім зябер, у процесі філогенетичного розвитку утворюються парні легені, дає можливість цим видам тварин до двох діб перебувати без води або ж у мутній воді з низьким умістом кисню, а також пересуватися по поверхні наземного середовища.

Водночас у наукових літературних джерелах, посібниках, підручниках з анатомії риб, зоології хребетних тварин тощо (Алексієнко, 2007; Мельник та ін., 2008; Шерман та ін., 2009) особливості макро- та мікроскопічної будови легенів у дводишних

риб майже не описані або ж їх морфологічна будова подана лише у вигляді схематичних зображень.

Тому нами проведено дослідження морфології легень у дводишних риб, представником яких є кларієвий сом. У кісткових риб, для яких характерне двокамерне серце й одне коло кровообігу, кров по зябрових венах потрапляє у венозний синус, потім рухається в передсердя, шлуночок та артеріальний конус, звідки по черевній аорті у зябра, де відбувається газообмін (Fishman et al., 1985; Farmer, 1999; Amelio & Garofalo, 2023). Від зябер артеріальна кров по судинах надходить до органів і тканин, де віддає кисень та насичується вуглекислим газом, трансформуючись на венозну кров, звідки дезоксигенована кров по венах повертається до серця (Florindo et al., 2004; Hillman et al., 2013).

За результатами наших досліджень встановлено, що у кларієвого сома, крім зябрового, наявне також легеневе дихання. Це зумовило формування поряд із великим (соматичним) ще й малого (легеневого) кола кровообігу. Рух крові у великому колі почи-

нається зі шлуночка серця й завершується у правій половині передсердя. У малому колі кровообігу кров рухається від шлуночка до лівої половини передсердя.

Легені у ссавців розташовані в грудній порожнині та мають вигляд конуса. Така морфотопографія легень та їх форма, яка подібна до зрізаного конуса та дещо здавлена з боків, пов'язана з розміщенням їх у грудній порожнині, яка надає правій та лівій легені загалом таку форму (Amin-Naves et al., 2004; Barreto & Volpato, 2004; Cieri, 2019; Gam et al., 2020). Це пов'язано з тим, що легені в природному стані разом із серцем та іншими органами грудної порожнини (аорта, стравохід, тимус тощо) загалом відтворюють форму грудної порожнини (Smits et al., 1994; Katz, 1996; Vanderelst et al., 2012).

Легені кларієвого сома, за результатами наших досліджень, є парними комірчастими структурами блідо-рожевого кольору, які розташовані у сформованих правій та лівій навколозаябрових порожнинах і прикріплюються до задньої частини заябрових дуг.

У ссавців ліва та права легені з боку вентрального краю глибокими вирізками поділяються на краніальну, середню та каудальну частки: на правій легені розташована ще й додаткова частка (Maina & van Gils, 2001; Roux, 2002; Horalskyi et al., 2022b).

У кларієвого сома, за результатами досліджень, кожна легеня покрита сполучнотканинною оболонкою (плеврою), яка утворена трьома шарами: зовнішнім, середнім та внутрішнім.

Макроскопічно права та ліва легеня побудовані з великої (медіальної) та малої (латеральної) часток. На кожній легені диференціюють краніальний, каудальний і латеральний краї та виділяють дорсальну (спрямовану до дорсальної частини тулуба), вентральну (спрямовану до вентральної частини тулуба) та середостінну (спрямовану до середостіння) поверхні.

У ссавців порівняно з іншими класами хребетних тварин легені є більш морфофункціонально досконалими. Основною особливістю їх будови у ссавців є диференціація тканин легень на повітроносні шляхи – бронхіальне дерево (головні, великі, середні, малі бронхи) та на респіраторний відділ – альвеолярне дерево (альвеолярні ходи, альвеолярні мішочки, альвеоли), де відбувається газообмін (Torday & Rehan, 2004).

Галуження бронхіального дерева у ссавців, майже всіх його структурних компонентів, до часточкових бронхів, відбувається за магістральним типом, лише часточкові бронхи галузяться за дихотомічним типом. При цьому трахея у місці біфуркації поділяється на два головні бронхи, які потім галузяться на великі, середні, бронхи та термінальні бронхіоли (Horsfield, 1976; Scrivani & Percival, 2023).

За результатами аналізу макро- та мікроскопічної будови бронхіальне дерево легень кларієвого сома має певні особливості порівняно з таким у тварин класу ссавці. У кларієвого сома, починаючи від заябрових дуг, кожна легеня розгалужується деревоподібно, формуючи структури бронхіального дерева, подібні до таких у ссавців. При цьому головний стовбур медіальної частки легень поділяється на чотири великі гілки, які галузяться на середні, останні – на малі гілки, формуючи деревоподібну структуру. Малі гілки бронхіального дерева кожної легені галузяться на окремі гілочки, які віддають початок товстостінним міхурцям. Латеральна частка легень сформована окремим стовбуром, який не поєднаний із медіальною часткою легень і має відповідне галуження бронхіального дерева (Tongo & Erhunmwunse, 2022).

Бронхи ссавців, залежно від їх калібру, порівняно з такими у дводишних риб, мають певні морфологічні особливості: вони складаються зі слизової оболонки, волокнисто-хрящової оболонки та адвентиції. У ссавців у структурі стінки бронхів наявна волокнисто-хрящова оболонка: у стінці головних бронхів у вигляді суцільних хрящових кілець; у стінці великих бронхів у вигляді окремих, різної величини і форми, хрящових пластинок – хрящевих острівців; у стінці середніх бронхів у вигляді окремих острівців, сформованих гіаліновим хрящем (місцями еластичним хрящем). Саме така особливість будови стінки бронхів ссавців створює умови, за яких бронхи не спадаються (McFawn & Mitchell, 1997).

У кларієвого сома, за результатами проведених нами досліджень, мікроскопічна будова стінки бронхів сформована трьома оболонками – зовнішньою, середньою та внутрішньою. Поверхня зовнішньої оболонки стінки бронхів утворена епітеліальними клітинами. Останні, вп'ячуючись у глибину оболонки, формують видовженої форми ворсинки. Після епітеліальної пластинки розташована власна пластинка,

утворена пухкою сполучною тканиною, у якій проходить мережа судин – артерій, венул, капілярів і більших судин, якими тече кров у легеновому колі кровообігу. М'язова (середня) оболонка стінки бронхів сильно розвинута й утворена поперечно посмугованою м'язовою тканиною, волокна якої мають поздовжній напрямок. Внутрішня оболонка стінки бронхів досить тоненька та сформована видовженої форми епітеліальними клітинами. Подібна мікроскопічна будова характерна і для середніх та малих бронхів, які закінчуються бронхіальними міхурцями, що мають округлу форму. Їх стінка сформована подібно до такої у бронхів. У сполучнотканинній оболонці стінки міхурців розташовано багато судин гемокроциркуляторного русла, які беруть участь у газообміні, де шляхом дифузії крізь стінки міхурців та кровоносних капілярів кисень із повітря потрапляє у кров, а вуглекислий газ – з крові у судини (Abalaka et al., 2021; Ogunwole et al., 2021; Hassan et al., 2023).

Отже, за результатами літературних даних, у тварин класу ссавці, специфічні особливості будови стінки бронхів (наявність волокнисто-хрящової оболонки) створюють умови, за яких бронхи не спадаються.

У кларієвого сома, за результатами наших досліджень, просвіт бронхів на всьому проміжку бронхіального дерева, аж до легенових міхурців, заповнений ретикулярною тканиною. Ретикулярна тканина – це сітчастий підтримуючий каркас для м'яких органів, як-от лімфатична тканина, селезінка, лімфатичні вузли, кістковий мозок, печінка тощо. Вона побудована з ретикулярних клітин (ретикулоцитів) і ретикулярних волокон. Ретикулоцити мають зірчасту або видовжену форму з великою кількістю довгих відростків та світле ядро. Відростки клітин, щільно з'єднуючись між собою, формують сіткоподібну масу, яка разом із мережею ретикулярних волокон становить остов (stroma) кровотворних органів тощо (Lütge et al., 2021).

Отже, завдяки такій унікальній морфологічній будові бронхів і легенових міхурців у кларієвого сома, просвіт яких заповнений ретикулярною тканиною, їх стінки не спадаються, що формує відповідні умови для постійного руху повітря в порожнині бронхіального дерева.

На основі гістометричних досліджень і математичного аналізу, які часто використовують у морфології, встановлено різні гістометричні параметри бронхіального дерева залежно від величини бронхів,

їх функціонального навантаження під час руху повітря по дихальних шляхах легень у напрямку до легенових міхурців для забезпечення надходження до організму кисню та використання його в окиснювальних реакціях. При цьому, за результатами морфометрії найбільші морфометричні параметри (товщина бронхів, товщина стінки бронхів, товщина порожнини бронхів) характерні для великих бронхів, потім для бронхів середнього калібру, і найменші показники характерні для малих бронхів.

Важливе значення у морфології має дослідження морфометричних критеріїв (площа, об'єм, співвідношення тих чи інших показників тощо), характеристики яких стають дедалі актуальнішими в морфологічному дослідженні в нормі та за патології і є дуже наочними показниками, за якими можна судити про структуру та функціональний стан органів і тканин. За результатами проведених нами морфометричних досліджень середній об'єм легенового міхурця кларієвого сома дорівнює $94\,770 \pm 909$ тис. мкм³, середній об'єм порожнини міхурця, заповненої ретикулярною тканиною, становить $27\,862 \pm 413$ тис. мкм³. Відношення об'єму порожнини міхурця до об'єму його стінки становить 0,4164.

Гістометричні дослідження, які часто використовують у гістології, дають змогу не лише чітко та достовірно аналізувати кількісні зміни на тканинному рівні, але й детально провести глибокий аналіз гістоархітектоніки організму, а саме органів дихання, у тому числі легень у процесі індивідуального розвитку та у філогенезі. Це не випадково, оскільки математичний аналіз структур морфологічних об'єктів отримав визнання як метод, що відрізняється об'єктивністю та достовірністю.

Саме тому проведені нами кількісні гістометричні дослідження легень із позиції оцінки їх пластичності у тварин різних рівнів організації, а саме представників класу дводишні риби, з різною екологічно-функціональною організацією, які характеризуються помірним ступенем активності та середовищем їх перебування у водному (напівводному) середовищі, дади можливість виявити певні закономірності, тенденції та критерії щодо структурної організації легень, їх гістоархітектоніку на тканинному рівні організації.

Висновки

1. Легені кларієвого сома – парні органи блідо-рожевого кольору, що мають анатомічну структуру з комірчастими стінками та

поєднуються зі стравоходом, забезпечуючи атмосферне дихання. Вони покриті сполучнотканинною оболонкою (плеврою) товщиною $552,6 \pm 7,86$ мкм, яка складається з трьох шарів: зовнішнього, середнього та внутрішнього.

2. Права та ліва легені сформовані медіально та латеральною частками: медіальні частки розміщені в краніальній частині тулуба, відповідно праворуч і ліворуч від стравоходу; латеральні частки примикають до дорсальних поверхонь медіальних часток, краніально межуючи із зябровими дугами.

Починаючи від зябрових порожнин, головний стовбур медіальної частки легень деревоподібно розгалужується на чотири великі гілки, великі – на середні, а останні – на малі, які діляться на окремі гілочки, віддаючи початок товстостінним міхурцям. Латеральна частка легень починається окремим стовбуром, який не поєднаний із медіальною часткою легень. На легенях морфологічно виділяють дорсальну, вентральну, середостінну поверхні та краніальний, каудальний і латеральний краї.

3. Мікроскопічна будова стінки бронхів легень кларієвого сома складається з трьох

оболонок – зовнішньої, середньої (м'язової) та внутрішньої. Поверхня стінки зовнішньої оболонки сформована епітеліальними клітинами, які формують видовженої форми ворсинки. Власна пластинка зовнішньої оболонки утворена пухкою сполучною тканиною, у якій розташована мережа кровоносних судин. М'язова оболонка стінки бронхів утворена поперечно посмугованою м'язовою тканиною, волокна якої мають поздовжній напрямок. Внутрішня оболонка стінки бронхів тоненька та сформована видовженої форми епітеліальними клітинами.

4. Порожнина бронхів на всьому проміжку бронхіального дерева, аж до легневих міхурців, заповнена ретикулярною тканиною, ретикулярні клітини якої разом з ретикулярними волокнами (переплітаючись між собою) формують підтримуючий сітчастий каркас (основу) порожнини бронхіального дерева, завдяки чому бронхи не спадаються. Легеневі міхурці на поперечному зрізі мають округлу форму. У їх стінці сполучнотканинної оболонки виявляється значна мережа судин (капілярів) мікроциркуляторного русла.

Список використаної літератури

- Алексієнко В.Р. Іхтіологія : посібник. Київ : Український фітосоціологічний центр, 2007. 116 с.
- Горальський А.П., Хомич В.Т., Кононський О.І. Основи гістологічної техніки і морфофункціональні методи досліджень у нормі та при патології : навч. посіб. вид. 3-є, випр. і допов. Житомир : Полісся, 2015. 286 с.
- Мельник О.П., Костюк В.В., Шевченко П.Г. Анатомія риб : підручник. Київ : Центр учбової літератури, 2008. 620 с.
- Шерман І.М., Пилипенко Ю.В., Шевченко П.Г. Загальна іхтіологія : підручник. Київ : Аграрна освіта, 2009. 454 с.
- Царик Й.В., Хамар І.С., Дикий І.В. Зоологія хордових : підручник. Львів : ЛНУ ім. Івана Франка, 2018. 356 с.
- Abalaka S.E., Oyelowo F.O., Akande M.G., Tenuche O.Z., Sani N.A., Adeyemo B.T., Idoko I.S., Ogbe A.O., Ejeh S.A. Effects of Moringa oleifera leaves extract, vitamin C, and taurine co-exposures on calcium and metallothionein levels, oxidative stress, and gill histopathological changes in *Clarias gariepinus* exposed to sub-lethal cadmium. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. P. 5225–52271. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14426-z>.
- Amelio D., Garofalo F. Morpho-functional changes of lungfish *Protopterus dolloi* skin in the shift from freshwater to aestivating conditions. *Comparative biochemistry and physiology. Part B, Biochemistry & molecular biology*. 2023. Vol. 266. P. 110846. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2023.110846>.
- Amin-Naves J., Giusti H., Glass M.L. Effects of acute temperature changes on aerial and aquatic gas exchange, pulmonary ventilation and blood gas status in the South American lungfish, *Lepidosiren paradoxa*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*. 2004. Vol. 138. №. 2. P. 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2004.02.016>.
- Barreto R.E., Volpato G.L. Caution for using ventilatory frequency as an indicator of stress in fish. *Behavioural processes*. 2004. Vol. 66. № 1. P. 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2004.01.001>.

- Baßmann B., Brenner M., Palm H.W. Stress and welfare of african catfish (*clarias gariepinus* Burchell, 1822) in a coupled aquaponic system. *Water*. 2017. Vol. 9. № 7. P. 504. <https://doi.org/10.3390/w9070504>.
- Britz P.J., Hecht T. Temperature preferences and optimum temperature for growth of african sharptooth catfish (*clarias gariepinus*) larvae and postlarvae. *Aquaculture*. 1987. Vol. 63. № 1–4. P. 205–214. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(87\)90072-X](https://doi.org/10.1016/0044-8486(87)90072-X).
- Chervinski J. Salinity tolerance of young catfish, *Clarias lazera* (Burchell). *Journal of Fish Biology*. 1984. Vol. 25. № 2. P. 147–149. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1984.tb04861.x>.
- Cieri R.L. Pulmonary smooth muscle in vertebrates: a comparative review of structure and function. *Integrative and comparative biology*. 2019. Vol. 59. № 1. P. 10–28. <https://doi.org/10.1093/icb/icz002>.
- Clay D. Preliminary observations on salinity tolerance *Clarias lazera*, Israel. *Bamidgeh*. 1977. Vol. 29. № 3. P. 102–109.
- Da Silva G.S.F., Ventura D.A.D.N., Zena L.A., Giusti H., Glass M.L., Klein W. Effects of aerial hypoxia and temperature on pulmonary breathing pattern and gas exchange in the South American lungfish, *Lepidosiren paradoxa*. *Molecular & Integrative Physiology*. 2017. Vol. 207. P. 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2017.03.001>.
- DeLaney R.G., Laurent P., Galante R., Pack A.I., Fishman A.P. Pulmonary mechanoreceptors in the dipnoi lungfish *Protopterus* and *Lepidosiren*. *The American journal of physiology*. 1983. Vol. 244. № 3. P. R418–R428. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.1983.244.3.R418>.
- Farmer C.G. Evolution of the vertebrate cardio-pulmonary system. *Annual review of physiology*. 1999. Vol. 61. P. 573–592. <https://doi.org/10.1146/annurev.physiol.61.1.573>.
- Fishman A.P., DeLaney R.G., Laurent P. Circulatory adaptation to bimodal respiration in the dipnoan lungfish. *Journal of applied physiology*. 1985. Vol. 59. № 2. P. 285–294. <https://doi.org/10.1152/jappl.1985.59.2.285>.
- Florindo L.H., Reid S.G., Kalinin A.L., Milsom W.K., Rantin F.T. Cardiorespiratory reflexes and aquatic surface respiration in the neotropical fish tambaqui (*Colossoma macropomum*): acute responses to hypercarbia. *Journal of comparative physiology. B, Biochemical, systemic, and environmental physiology*. 2004. Vol. 174. № 4. P. 319–328. <https://doi.org/10.1007/s00360-004-0417-5>.
- Gam L.T.H., Thanh Huong D.T., Tuong D.D., Phuong N.T., Jensen F.B., Wang T., Bayley M. Effects of temperature on acid-base regulation, gill ventilation and air breathing in the clown knifefish, *Chitala ornata*. *The Journal of experimental biology*. 2020. Vol. 223. № 4. P. jeb216481. <https://doi.org/10.1242/jeb.216481>.
- Hassan M., Melad A.A.N., Zakariah M.I., Yusoff N.A.H. Histopathological alterations in gills, liver and kidney of african catfish (*Clarias gariepinus*, Burchell 1822) exposed to melaleuca cajuputi extract. *Tropical Life Sciences Research*. 2023. Vol. 34. № 2. P. 177–196. <https://doi.org/10.21315/tlsr2023.34.2.9>.
- Hecht T., Oellermann L., Verheust L. Perspectives on clarid culture in Africa. *The Biology and Culture of Catfishes*. 1996. Vol. 9. P. 197–206. <https://doi.org/10.1051/alr:1996054>.
- Hildebrand M.-C., Rebl A., Nguinkal J.A., Palm H.W., Baßmann B. Effects of Fe-DTPA on health and welfare of the african catfish *clarias gariepinus* (Burchell, 1822). *Water*. 2023. Vol. 15. № 2. P. 299. <https://doi.org/10.3390/w15020299>.
- Hillman S.S., Hancock T.V., Hedrick M.S. A comparative meta-analysis of maximal aerobic metabolism of vertebrates: implications for respiratory and cardiovascular limits to gas exchange. *Journal of Comparative Physiology. B, Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology*. 2013. Vol. 183. № 2. P. 167–179. <https://doi.org/10.1007/s00360-012-0688-1>.
- Hogendorn H., Vismans M.M. Controlled propagation of the Africa *Clarias lazera* (C.&V.). II. Artificial reproduction. *Aquaculture*. 1980. Vol. 21. № 1. P. 39–53. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(80\)90124-6](https://doi.org/10.1016/0044-8486(80)90124-6).
- Honcharova O.V., Paraniak R.P., Kutishchev P.S., Paraniak N.M., Hradovych N.I., Matsuska O.V., Rudenko O.P., Lytvyn N.A., Gutyj B.V., Maksishko L.M. The influence of environmental factors on fish productivity in small reservoirs and transformed waters. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2021. Vol. 11. № 1. P. 176–180. https://doi.org/10.15421/2021_27.
- Horalskyi L.P., Demus N.V., Sokulskyi I.M., Gutyj B.V., Kolesnik N.L., Pavliuchenko O.V., Horalska I.Y. Species specifics of morphology of the liver of the fishes of the Cyprinidae family. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2023. Vol. 14. № 2. P. 234–241. <https://doi.org/10.15421/022335>.

- Horalskyi L., Hlukhova N., Sokulskyi I. Morphological traits of rabbit lung. *Scientific Horizons*. 2020. Vol. 93. № 8. P. 180–188. <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2020-93-8-180-188>.
- Horalskyi L.P., Hlukhova N., Sokulskyi I., Kolesnik N. Morphological features and morphometric parameters of the lungs of sexually mature horses (*Equus Ferus Caballus* L., 1758). *Ukrainian Journal of Veterinary Sciences*. 2022a. Vol. 13. № 1. P. 25–33. [https://doi.org/10.31548/ujvs.13\(1\)](https://doi.org/10.31548/ujvs.13(1)).
- Horalskyi L.P., Ragulya M.R., Glukhova N.M., Sokulskiy I.M., Kolesnik N.L., Dunaievska O.F., Gutyj B.V., Goralska I.Y. Morphology and specifics of morphometry of lungs and myocardium of heart ventricles of cattle, sheep and horses. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2022b. Vol. 13. № 1. P. 53–59. <https://doi.org/10.15421/022207>.
- Horsfield K. Morphology of the bronchial tree in the dog. *Respiration Physiology*. 1976. Vol. 26. № 2. P. 173–182. [https://doi.org/10.1016/0034-5687\(76\)90095-5](https://doi.org/10.1016/0034-5687(76)90095-5).
- Huang C.Y., Lee W., Lin H.C. Functional differentiation in the anterior gills of the aquatic air-breathing fish, *Trichogaster leerii*. *Journal of Comparative Physiology. B, Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology*. 2008. Vol. 178. № 1. P. 111–121. <https://doi.org/10.1007/s00360-007-0205-0>.
- Huisman E.A., Richter, C.J.J. Reproduction, growth, health control and aquacultural potential of the african catfish, *clarias gariepinus* (Burchell 1822). *Aquaculture*. 1987. Vol. 63. № 1–4. P. 1–14. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(87\)90057-3](https://doi.org/10.1016/0044-8486(87)90057-3).
- Katz S.L. Ventilatory control in a primitive fish: signal conditioning via non-linear O₂ affinity. *Respiration Physiology*. 1996. Vol. 103. № 2. P. 165–175. [https://doi.org/10.1016/0034-5687\(95\)00081-x](https://doi.org/10.1016/0034-5687(95)00081-x).
- Kofonov K., Potrokhov O., Hrynevych N., Zinkovskyi O., Khomiak O., Dunaievska O., Rud O. et al. Changes in the biochemical status of common carp juveniles (*Cyprinus carpio* L.) exposed to ammonium chloride and potassium phosphate. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020. Vol. 10. № 4. P. 137–147.
- Lawal B.M., Adewole H.A., Olaleye V.F. Digestibility study and nutrient re-evaluation in *clarias gariepinus* fed blood meal-rumen digesta blend diet. *Notulae Scientia Biologicae*. 2017. Vol. 9. № 3. P. 344–349. <https://doi.org/10.15835/nsb9310047>.
- Lütge M., Pikor N.B., Ludewig B. Differentiation and activation of fibroblastic reticular cells. *Immunological Reviews*. 2021. Vol. 302. № 1. P. 32–46. <https://doi.org/10.1111/imr.12981>.
- Maina J.N., van Gils P. Morphometric characterization of the airway and vascular systems of the lung of the domestic pig, *Sus scrofa*: comparison of the airway, arterial and venous systems. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part A, Molecular & Integrative Physiology*. 2001. Vol. 130. № 4. P. 781–798. [https://doi.org/10.1016/s1095-6433\(01\)00411-1](https://doi.org/10.1016/s1095-6433(01)00411-1).
- McFawn P.K., Mitchell H.W. Bronchial compliance and wall structure during development of the immature human and pig lung. *The European Respiratory Journal*. 1997. Vol. 10. № 1. P. 27–34. <https://doi.org/10.1183/09031936.97.10010027>.
- Kukhtyn M., Malimon Z., Salata V., Rogalskyi I., Gutyj B., Kladnytska L., Kravcheniuk K., Horiuk Y. The Effects of antimicrobial residues on microbiological content and the antibiotic resistance in frozen fish. *World's Veterinary Journal*. 2022. Vol. 12. № 4. P. 374–381. <https://doi.org/10.54203/scil.2022.vwj47>.
- Ogunwale G.A., Saliu J.K., Osuala F.I., Odunjo F.O. Chronic levels of ibuprofen induces haematotoxic and histopathology damage in the gills, liver, and kidney of the African sharptooth catfish (*Clarias gariepinus*). *Environmental Science and Pollution Research International*. 2021. Vol. 28. № 20. P. 25603–25613. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12286-7>.
- Roux E. Origine et évolution de l'appareil respiratoire aérien des Vertébrés. *Revue Des Maladies Respiratoires*. 2002. Vol. 19. № 5. Pt 1. P. 601–615.
- Rudenko O.P., Paranjak R.P., Kovalchuk N.A., Kit L.P., Hradovych N.I., Gutyj B.V., Kalyn B.M., Sukhorska O.P., Butsiak A.A., Kropyvka S.I., Petruniv V.V., Kovalska L.M. Influence of seasonal factors on carp fish immune reactivity. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2019. Vol. 9. № 3. P. 168–173.
- Scrivani P.V., Percival A. Anatomic study of the canine bronchial tree using silicone casts, radiography, and CT. *Veterinary Radiology & Ultrasound: the official journal of the American College of Veterinary Radiology and the International Veterinary Radiology Association*. 2023. Vol. 64. № 1. P. 36–41. <https://doi.org/10.1111/vru.13141>.
- Smits A.W., Orgeig S., Daniels C.B. Surfactant composition and function in lungs of air-breathing fishes. *The American Journal of Physiology*. 1994. Vol. 266 (4 Pt 2). P. R1309–R1313. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.1994.266.4.R1309>.

Juin, S.K., Sarkar, S., Maitra, S., & Nath, P. Effect of fish vitellogenin on the growth of juvenile catfish, *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822). *Aquaculture Reports*. 2017. Vol. 7. P. 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2017.05.001>.

Tongo I., Erhunmwunse N.O. Effects of ingestion of polyethylene microplastics on survival rate, opercular respiration rate and swimming performance of African catfish (*Clarias gariepinus*). *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Vol. 423 (Pt B). P. 127237. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127237>.

Torday J.S., Rehan V.K. Deconvoluting lung evolution using functional/comparative genomics. *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology*. 2004. Vol. 31. № 1. P. 8–12. <https://doi.org/10.1165/rcmb.2004-0019TR>.

Ukagwu J.I., Anyanwu, D.C, Offor, J.I., Nduka, C.O. Comparative studies of nutrient composition of wild caught and pond reared african catfish, *Clarias gariepinus*. *International Journal of Research in Applied, Natural and Social Sciences*. 2017. Vol. 5. № 7. P. 63–68.

Vanderelst D., Jonas R., Herbert P. The furrows of Rhinolophidae revisited. *Journal of the Royal Society, Interface*. 2012. Vol. 9. № 70. P. 1100–1103. <https://doi.org/10.1098/rsif.2011.0812>.

Zadorozhnii M., Bekh V. First experience of cultivating african catfish (*Clarias gariepinus* Burchell, 1822) under natural temperature conditions in water bodies of Polissiya of Ukraine. *Ribogospodarska Nauka Ukrainy*. 2024. Vol. 1. № 67. P. 74–88. <https://doi.org/10.61976/fsu2024.01.074>.

References

Aleksienko, V.R. (2007). *Ikhtiologia*. [Ichthyology]. Posibnyk dlia studentiv biolohichnykh fakultetiv [A guide for students of biological faculties]. Kyiv : Ukrainskyi fitosotsiolohichnyi tsentr [in Ukrainian].

Horalskyi, L.P., Khomych, V.T. & Kononskyi, O.I. (2015). *Osnovy histolohichnoi tekhniky i morfofunktsionalni metody doslidzhennia u normi ta pry patolohii* [Basics of histological technique and morphofunctional methods of research in normal and pathology]. Zhytomyr : Polissia [in Ukrainian].

Melnyk, O.P., Kostiuk, V.V., & Shevchenko, P.H. (2008). *Anatomii ryb* [Fish anatomy]. Kyiv : Tsentr uchbovoi literatury [in Ukrainian].

Sherman, I.M., Pylypenko, Yu.V., & Shevchenko, P.H. (2009). *Zahalna ikhtiologia: pidruchnyk* [General ichthyology: textbook]. Kyiv : Ahrarna osvita [in Ukrainian].

Tsaryk, Y.V., Khamar, I.S., & Dykyi, I.V. (2018). *Zoolohiia khordovykh: pidruchnyk* [Chordate Zoology: Textbook] Lviv : Lvivskyi natsionadnyi universytet imeni Ivana Franka [in Ukrainian].

Abalaka S.E., Oyelowo F.O., Akande M.G., Tenuche O.Z., Sani N.A., Adeyemo B.T., Idoko I.S., Ogbe A.O., & Ejeh S.A. (2021). Ejeh. Effects of *Moringa oleifera* leaves extract, vitamin C, and taurine co-exposures on calcium and metallothionein levels, oxidative stress, and gill histopathological changes in *Clarias gariepinus* exposed to sub-lethal cadmium. *Environmental Science and Pollution Research*, 28 (37), 52258–52271. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14426-z> [in English].

Amelio, D., & Garofalo, F. (2023). Morpho-functional changes of lungfish *Protopterus dolloi* skin in the shift from freshwater to aestivating conditions. *Comparative biochemistry and physiology. Part B, Biochemistry & molecular biology*, 266, 110846. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2023.110846> [in English].

Amin-Naves, J., Giusti, H., & Glass, M.L. (2004). Effects of acute temperature changes on aerial and aquatic gas exchange, pulmonary ventilation and blood gas status in the South American lungfish, *Lepidosiren paradoxa*. *Comparative biochemistry and physiology. Part A, Molecular & integrative physiology*, 138 (2), 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2004.02.016> [in English].

Barreto, R.E., & Volpato, G.L. (2004). Caution for using ventilatory frequency as an indicator of stress in fish. *Behavioural processes*, 66 (1), 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2004.01.001> [in English].

Baßmann, B., Brenner, M., & Palm, H.W. (2017). Stress and welfare of african catfish (*clarias gariepinus* Burchell, 1822) in a coupled aquaponic system. *Water*, 9 (7), 504. <https://doi.org/10.3390/w9070504> [in English].

Britz, P.J., & Hecht, T. (1987). Temperature preferences and optimum temperature for growth of african sharptooth catfish (*clarias gariepinus*) larvae and postlarvae. *Aquaculture*, 63 (1–4), 205–214. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(87\)90072-X](https://doi.org/10.1016/0044-8486(87)90072-X) [in English].

Chervinski, J. (1984). Salinity tolerance of young catfish, *Clarias lazera* (Burchell). *Journal of Fish Biology*, 25 (2), 147–149. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1984.tb04861.x> [in English].

- Cieri, R.L. (2019). Pulmonary smooth muscle in vertebrates: a comparative review of structure and function. *Integrative and comparative biology*, 59 (1), 10–28. <https://doi.org/10.1093/icb/icz002> [in English].
- Clay, D. (1977). Preliminary observations on salinity tolerance *Clarias lazera*, Israel. *Bamidgeh*, 29 (3), 102–109 [in English].
- Da Silva, G.S.F., Ventura, D. A.D.N., Zena, L.A., Giusti, H., Glass, M.L., & Klein, W. (2017). Effects of aerial hypoxia and temperature on pulmonary breathing pattern and gas exchange in the South American lungfish, *Lepidosiren paradoxa*. *Comparative biochemistry and physiology. Part A, Molecular & integrative physiology*, 207, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2017.03.001> [in English].
- DeLaney, R.G., Laurent, P., Galante, R., Pack, A.I., & Fishman, A.P. (1983). Pulmonary mechanoreceptors in the dipnoi lungfish *Protopterus* and *Lepidosiren*. *The American journal of physiology*, 244 (3), R418–R428. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.1983.244.3.R418> [in English].
- Farmer, C.G. (1999). Evolution of the vertebrate cardio-pulmonary system. *Annual review of physiology*, 61, 573–592. <https://doi.org/10.1146/annurev.physiol.61.1.573> [in English].
- Fishman, A.P., DeLaney, R.G., & Laurent, P. (1985). Circulatory adaptation to bimodal respiration in the dipnoan lungfish. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 59 (2), 28–294. <https://doi.org/10.1152/jappl.1985.59.2.285> [in English].
- Florindo, L.H., Reid, S.G., Kalinin, A.L., Milsom, W.K., & Rantin, F.T. (2004). Cardiorespiratory reflexes and aquatic surface respiration in the neotropical fish tambaqui (*Colossoma macropomum*): acute responses to hypercarbia. *Journal of comparative physiology. B, Biochemical, systemic, and environmental physiology*, 174 (4), 319–328. <https://doi.org/10.1007/s00360-004-0417-5> [in English].
- Gam, L.T. H., Thanh Huong, D.T., Tuong, D.D., Phuong, N.T., Jensen, F.B., Wang, T., & Bayley, M. (2020). Effects of temperature on acid-base regulation, gill ventilation and air breathing in the clown knifefish, *Chitala ornata*. *The Journal of experimental biology*, 223 (Pt 4), jeb216481. <https://doi.org/10.1242/jeb.216481> [in English].
- Hassan, M., Melad, A.A.N., Zakariah, M.I., & Yusoff, N.A.H. (2023). Histopathological alterations in gills, liver and kidney of african catfish (*Clarias gariepinus*, Burchell 1822) exposed to melaleuca cajuputi extract. *Tropical Life Sciences Research*, 34 (2), 177–196. <https://doi.org/10.21315/tlsr2023.34.2.9> [in English].
- Hecht, T., Oellermann, L., & Verheust, L. (1996). Perspectives on clarid culture in Africa. *The Biology and Culture of Catfishes*, 9, 197–206. <https://doi.org/10.1051/alr:1996054> [in English].
- Hildebrand, M.-C., Rebl, A., Nguinkal, J.A., Palm, H.W., & Baßmann, B. (2023). Effects of Fe-DTPA on health and welfare of the african catfish *clarias gariepinus* (Burchell, 1822). *Water*, 15 (2), 299. <https://doi.org/10.3390/w15020299> [in English].
- Hillman, S.S., Hancock, T.V., & Hedrick, M.S. (2013). A comparative meta-analysis of maximal aerobic metabolism of vertebrates: implications for respiratory and cardiovascular limits to gas exchange. *Journal of Comparative Physiology. B, Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology*, 183 (2), 167–179. <https://doi.org/10.1007/s00360-012-0688-1> [in English].
- Hogendorn, H., & Vismans, M.M. (1980). Controlled propagation of the Africa *Clarias lazera* (C.&V.). II. Artificial reproduction. *Aquaculture*, 21 (1), 39–53. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(80\)90124-6](https://doi.org/10.1016/0044-8486(80)90124-6) [in English].
- Honcharova, O.V., Paraniak, R.P., Kutishchev, P.S., Paraniak, N.M., Hradovych, N.I., Matsuska, O.V., Rudenko, O.P., Lytvyn, N.A., Gutyj, B.V., & Maksishko, L.M. (2021). The influence of environmental factors on fish productivity in small reservoirs and transformed waters. *Ukrainian Journal of Ecology*, 11 (1), 176–180. https://doi.org/10.15421/2021_27 [in English].
- Horalskyi, L.P., Demus, N.V., Sokulskyi, I.M., Gutyj, B.V., Kolesnik, N.L., Pavliuchenko, O.V., & Horalska, I.Y. (2023). Species specifics of morphology of the liver of the fishes of the Cyprinidae family. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 14 (2), 234–241. <https://doi.org/10.15421/022335> [in English].
- Horalskyi, L.P., Hlukhova, N., Sokulskyi, I.M., & Kolesnik, N.L. (2022). Morphological features and morphometric parameters of the lungs of sexually mature horses (*Equus Ferus Caballus* L., 1758). *Ukrainian Journal of Veterinary Sciences*, 13 (1), 25–33. <https://doi.org/10.31548/ujvs> [in English].
- Horalskyi, L.P., Hlukhova, N.M., & Sokulskyi, I.M. (2020). Morphological features of rabbit lungs. *Scientific horizons*, 08 (93), 180–188. <https://doi.org/10.15421/022335> [in English].

- Horalskyi, L.P., Ragulya, M.R., Glukhova, N.M., Sokulskiy, I.M., Kolesnik, N.L., Dunaievskaya, O.F., Gutyj, B.V., & Goralska, I.Y. (2022). Morphology and specifics of morphometry of lungs and myocardium of heart ventricles of cattle, sheep and horses. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 13 (1), 53–59. <https://doi.org/10.15421/022207> [in English].
- Horsfield, K. (1976). Morphology of the bronchial tree in the dog. *Respiration Physiology*, 26 (2), 173–182. [https://doi.org/10.1016/0034-5687\(76\)90095-5](https://doi.org/10.1016/0034-5687(76)90095-5) [in English].
- Huang, C.Y., Lee, W., & Lin, H.C. (2008). Functional differentiation in the anterior gills of the aquatic air-breathing fish, *Trichogaster leeri*. *Journal of Comparative Physiology. B, Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology*, 178 (1), 111–121. <https://doi.org/10.1007/s00360-007-0205-0> [in English].
- Huisman, E.A., & Richter, C.J.J. (1987). Reproduction, growth, health control and aquacultural potential of the african catfish, *clarias gariepinus* (Burchell 1822). *Aquaculture*, 63 (1–4), 1–14. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(87\)90057-3](https://doi.org/10.1016/0044-8486(87)90057-3) [in English].
- Juin, S.K., Sarkar, S., Maitra, S., & Nath, P. (2017). Effect of fish vitellogenin on the growth of juvenile catfish, *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822). *Aquaculture Reports*, 7, 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2017.05.001> [in English].
- Katz, S.L. (1996). Ventilatory control in a primitive fish: signal conditioning via non-linear O₂ affinity. *Respiration Physiology*, 103 (2), 165–175. [https://doi.org/10.1016/0034-5687\(95\)00081-X](https://doi.org/10.1016/0034-5687(95)00081-X) [in English].
- Kofonov, K., Potrokhov, O., Hrynevych, N., Zinkovskyi, O., Khomiak, O., Dunaievskaya, O., Rud, O., Kutsocn, L., Chemerys, V., Gutyj, B., Fijalovych, L., Vavrysevych, J., Todoruk, V., Leskiv, K., Husar, P., & Khumynets, P. (2020). Changes in the biochemical status of common carp juveniles (*Cyprinus carpio* L.) exposed to ammonium chloride and potassium phosphate. *Ukrainian Journal of Ecology*, 10 (4), 137–147. https://doi.org/10.15421/2020_181 [in English].
- Kukhtyn, M., Malimon, Z., Salata, V., Rogalskyi, I., Gutyj, B., Kladnytska, L., Kravcheniuk, K., & Horiuk, Y. (2022). The Effects of antimicrobial residues on microbiological content and the antibiotic resistance in frozen fish. *World's Veterinary Journal*, 12 (4), 374–381. <https://doi.org/10.54203/scil.2022.wvj47> [in English].
- Lawal, B.M., Adewole, H.A., & Olaleye, V.F. (2017). Digestibility study and nutrient re-evaluation in *clarias gariepinus* fed blood meal-rumen digesta blend diet. *Notulae Scientia Biologicae*, 9 (3), 344–349. <https://doi.org/10.15835/nsb9310047> [in English].
- Lütge, M., Pikor, N.B., & Ludewig, B. (2021). Differentiation and activation of fibroblastic reticular cells. *Immunological Reviews*, 302 (1), 32–46. <https://doi.org/10.1111/imr.12981> [in English].
- Maina, J.N., & van Gils, P. (2001). Morphometric characterization of the airway and vascular systems of the lung of the domestic pig, *Sus scrofa*: comparison of the airway, arterial and venous systems. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part A, Molecular & Integrative Physiology*, 130 (4), 781–798. [https://doi.org/10.1016/S1095-6433\(01\)00411-1](https://doi.org/10.1016/S1095-6433(01)00411-1) [in English].
- McFawn, P.K., & Mitchell, H.W. (1997). Bronchial compliance and wall structure during development of the immature human and pig lung. *The European Respiratory Journal*, 10 (1), 27–34. <https://doi.org/10.1183/09031936.97.10010027> [in English].
- Ogunwale, G.A., Saliu, J.K., Osuala, F.I., & Odunjo, F.O. (2021). Chronic levels of ibuprofen induces haematotoxic and histopathology damage in the gills, liver, and kidney of the African sharptooth catfish (*Clarias gariepinus*). *Environmental Science and Pollution Research International*, 28 (20), 25603–25613. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12286-7> [in English].
- Okomoda, V.T., Wase, G., & Tiamiyu, L.O. (2017). Effects of tank background colour on growth performance and feed utilization of African Catfish *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822) fingerlings. *Ribarstvo. Croatian Journal of Fisheries*, 75 (1), 5–11. <https://doi.org/10.1515/cjf-2017-0002> [in English].
- Roux, E. (2002). Origine et évolution de l'appareil respiratoire aérien des Vertébrés. *Revue Des Maladies Respiratoires*, 19 (5 Pt 1), 601–615 [in English].
- Rudenko, O.P., Paranjak, R.P., Kovalchuk, N.A., Kit, L.P., Hradovych, N.I., Gutyj, B.V., Kalyn, B.M., Sukhorska, O.P., Butsiak, A.A., Kropyvka, S.I., Petruniv, V.V., & Kovalska, L.M. (2019). Influence of seasonal factors on carp fish immune reactivity. *Ukrainian Journal of Ecology*, 9 (3), 168–173 [in English].
- Scrivani, P.V., & Percival, A. (2023). Anatomic study of the canine bronchial tree using silicone casts, radiography, and CT. *Veterinary Radiology & Ultrasound: the official journal of the American College of Veterinary Radiology and the International Veterinary Radiology Association*, 64 (1), 36–41. <https://doi.org/10.1111/vru.13141> [in English].

Smits, A.W., Orgeig, S., & Daniels, C.B. (1994). Surfactant composition and function in lungs of air-breathing fishes. *The American Journal of Physiology*, 266 (4 Pt 2), R1309–R1313. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.1994.266.4.R1309> [in English].

Tongo, I., & Erhunmwunse, N.O. (2022). Effects of ingestion of polyethylene microplastics on survival rate, opercular respiration rate and swimming performance of African catfish (*Clarias gariepinus*). *Journal of Hazardous Materials*, 423 (Pt B), 127237. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127237> [in English].

Torday, J.S., & Rehan, V.K. (2004). Deconvoluting lung evolution using functional/comparative genomics. *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology*, 31 (1), 8–12. <https://doi.org/10.1165/rcmb.2004-0019TR> [in English].

Ukagwu, J.I., Anyanwu, D.C., Offor, J.I., & Nduka, C.O. (2017). Comparative studies of nutrient composition of wild caught and pond reared african catfish, *Clarias gariepinus*. *International Journal of Research in Applied, Natural and Social Sciences*, 5 (7), 63–68 [in English].

Vanderelst, D., Jonas, R., & Herbert, P. (2012). The furrows of *Rhinolophidae* revisited. *Journal of the Royal Society, Interface*, 9 (70), 1100–1103. <https://doi.org/10.1098/rsif.2011.0812> [in English].

Zadorozhnii, M., & Bekh, V. (2024). First experience of cultivating african catfish (*Clarias gariepinus* Burchell, 1822) under natural temperature conditions in water bodies of Polissiya of Ukraine. *Ribogospodarska Nauka Ukrainy*, 1 (67), 74–88. <https://doi.org/10.61976/fsu2024.01.074> [in English].

Отримано: 16.04.2025

Прийнято: 15.05.2025



УДК [591.1:577.7]:599.321.8
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.4>

ДИНАМІКА ВМІСТУ ЦИНКУ, МАГНІЮ ТА МІДІ В КЛІТИНАХ ТИМУСА ТВАРИН ЗА УМОВ ВВЕДЕННЯ СУЛЬФАТІВ ЦИХ МЕТАЛІВ

Н. В. Григорова¹

Цинк, магній і мідь є дуже важливими елементами в організмі людини та тварин. Вони впливають на діяльність різних фізіологічних систем, у тому числі імунної. Ці метали визначають роботу всіх ланок імунітету, а також виличкової залози – центрального органа імуногенезу. Дефіцит цинку, магнію та міді супроводжується поступовою атрофією тимуса та призводить до значного порушення процесів клітинного й гуморального імунітету. Тому дослідження вмісту металів у клітинах імунної системи, зокрема виличкової залози, є актуальними. Метою дослідження було вивчення змін вмісту цинку, магнію та міді в тимусних епітеліальних клітинах (ТЕК) мишей і щурів за умов введення сульфатів цих металів. Раніше такі дослідження не проводилися через брак досконалих методів цитохімічного визначення цих металів у клітинах виличкової залози. Розробка в нашій лабораторії цитохімічних реакцій 8-(паратолуолсульфоніламіно)-хіноліну на цинк, люмомагнезону на магній і люмокупферону на мідь у ТЕК дала можливість провести такі дослідження. Обчислювали коефіцієнт кореляції Пірсона (r) для оцінки ступеня зв'язку між змінами досліджених показників. Встановлено, що в клітинах виличкової залози мишей і щурів після введення сульфатів цинку та магнію підвищувався вміст цих металів на тлі нестачі міді. Під впливом сульфату міді в ТЕК тварин спостерігалися накопичення міді, а також дефіцит цинку та магнію. Проведений кореляційний аналіз засвідчив синергічний характер взаємин цинку та магнію у клітинах, антагоністичні відносини цих металів з міддю. Практичне значення роботи полягає в тому, що отримані результати дають можливість корегувати препаратами цинку, магнію та міді, а також дієтою, збагаченою на ці метали, порушення імунологічного статусу.

Ключові слова: внутрішньоклітинні метали, імунна система, кореляційні зв'язки, цитохімічні реакції.

¹ кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри фізіології, імунології і біохімії
з курсом цивільного захисту та медицини
(Запорізький національний університет, м. Запоріжжя)
e-mail: nvgrigorova@ukr.net
ORCID: 0009-0001-6195-7717

DYNAMICS OF ZINC, MAGNESIUM AND COPPER CONTENT IN THYMUS CELLS OF ANIMALS UPON ADMINISTRATION OF SULFATES OF THESE METALS

N. V. Hryhorova

Zinc, magnesium and copper are very important elements in the human and animal body. They affect the activity of various physiological systems, including the immune system. These metals determine the work of all links of immunity, as well as the thymus gland – the central organ of immunogenesis. Zinc, magnesium and copper deficiency is accompanied by gradual atrophy of the thymus and leads to a significant disruption of the processes of cellular and humoral immunity. Therefore, studies of the content of metals in cells of the immune system, in particular the thymus gland, are relevant. The aim of the study was to study changes in the content of zinc, magnesium and copper in thymic epithelial cells (TEC) of mice and rats upon administration of sulfates of these metals. Previously, such studies were not conducted due to the lack of perfect methods for the cytochemical determination of these metals in thymus cells. The development in our laboratory of cytochemical reactions of 8-(paratoluenesulfonylamino)-quinoline on zinc, lumomagnesone on magnesium and lumocupferone on copper in TEC allowed us to conduct the following studies. Pearson's correlation coefficient (r) was calculated to assess the degree of relationship between changes in the studied parameters. It was found that in the thymus cells of mice and rats after the administration of zinc and magnesium sulfates, the content of these metals increased against the background of copper deficiency. Under the influence of copper sulfate, copper accumulation was observed in the TEC of animals, as well as zinc and magnesium deficiency. The correlation analysis conducted showed the synergistic nature of the relationship in the cells of zinc and magnesium, and the antagonistic relationship between these metals and copper. The practical significance of the work lies in the fact that the results obtained make it possible to correct immunological status disorders with zinc, magnesium and copper preparations, as well as a diet enriched with these metals.

Key words: correlations, cytochemical reactions, immune system, intracellular metals.

Вступ

Цинк, магній і мідь є дуже важливими елементами в організмі людини та тварин. Цинк є кофактором великої групи ферментів, що беруть участь у білковому й інших видах обміну, тому він необхідний для нормального перебігу багатьох біохімічних процесів: синтезу білків, у т. ч. колагену для формування опорно-рухового апарату; функціонування десятків ферментів (антиоксидантного ферменту супероксиддисмутази); інсуліну підшлункової залози, забезпечує стабільність клітинних мембран; відіграє найважливішу роль у процесах регенерації шкіри, росту волосся та нігтів, секреції сальних залоз, загоєння ран (Зайченко та ін., 2021; Акімов та ін., 2023; Kiouri et al., 2023; Wang et al., 2024). Одна з найголовніших функцій міді полягає в синтезі гемоглобіну. Крім цього, йони Cu входять до складу меланіну. Мідь бере участь у фізіологічних та біохімічних процесах організму людини, зокрема в окисно-відновних реакціях у клітинах, імунних процесах, секреції колагену, підтриманні стабільності ліпопротеїнових мембран та зміцненні кісткової тканини (Srivastava & Wanjari, 2024). Магній є кофактором близько 40 ферментів вуглеводневого обміну, понад 30 фермен-

тів метаболізму ліпідів і ще понад 200 інших біологічно активних речовин потребують магнію для активації. Таким чином, магній впливає на велику кількість процесів в організмі тварин і людини, а саме: на обмін протеїнів, згортання крові, регуляцію кров'яного тиску та рівня глюкози в крові, синтез глутатіону – одного з найважливіших антиоксидантів, окисне фосфорилування тощо. Йони магнію зміцнюють мембрани клітин завдяки зв'язуванню негативно заряджених карбоксильних груп. Магній регулює кальцієві та натрієві канали в мембранах клітин, а отже, концентрацію цих металів у клітинах. Нормальна робота іонних каналів захищає м'язові клітини та нервові від гіперактивності, підтримує серцевий ритм. Цей макроеlement є важливим для росту й розвитку кісток через те, що він є активатором вітаміну D (Fiorentini et al., 2021).

Цинк, мідь і магній впливають на діяльність різних фізіологічних систем, зокрема імунної. Для проліферації і функціонування імунітетів потрібні цинк і магній щ огляду на їх роль у процесах реплікації ДНК, транскрипції РНК, ділення й активації клітини (Зайченко та ін., 2021; Fiorentini et al., 2021; Kiouri et al., 2023). Цинк визначає роботу всіх ланок імунітету, а також вилюч-

кової залози – центрального органа імунотенезу (Зайченко та ін., 2021; Prykhodko et al., 2023). Тимулін – гормон, який синтезується епітеліальними клітинами тимуса та бере участь у розвитку Т-лімфоцитів, проявляє активність тільки за умови комплексування з іонами Zn^{2+} у співвідношенні 1 : 1 (Reggiani et al., 2009; Abramson & Anderson, 2017). Відомо також про взаємодію тимуліну з прозапальними цитокінами. Протизапальна дія тимуліну та його аналога PAT («пептидний аналог тимуліну») виявляється як у периферичних тканинах, так і в головному мозку. Активація холінергічних рецепторів частково пов'язана із цим ефектом. Використання тимуліну та PAT є перспективним для лікування нейродегенеративних станів, викликаних умовно-патогенною або гострою інфекцією (Reggiani et al., 2009; Зайченко та ін., 2021). В експериментах на кількох моделях запалення підтверджено позитивний ефект тимуліну. Захисна дія гормону відмічена на експериментальних моделях тиреоїдиту, міокардиту, нефротоксичності, хронічного коліту і т. ін. Ефект тимуліну пов'язаний із пригніченням експресії прозапального цитокіну ІЛ-6 та інгібуванням p38 MAPK (Reggiani et al., 2014; Renata et al., 2023). Під час експериментів із вивчення впливу тимуліну на запалення, індуковане ліпополісахаридом, встановлено, що його захисний ефект може бути пов'язаний із запобіганням накопиченню прозапальних цитокінів ІЛ-1, ІЛ-6, фактор некрозу пухлини альфа (ФНП α) та γ -інтерферону в плазмі крові та зниженням синтезу білка теплового шоку HSP70 у лімфоцитах селезінки, який, як відомо, підвищується за гіперактивації імунних клітин у разі запалення (DiSilvestro et al., 2021). На моделях гострого аутоімунного енцефаломієліту, індукованого основним мієліновим білком, у мишей NZW тимулін знижував ступінь вираженості захворювання шляхом впливу на каскад ядерного фактора NF κ B (NF-9B), знижуючи рівень фосфорилювання сигнального білка IKK та продукції білка HSP72 (Reggiani et al., 2014; Renata et al., 2023). Було встановлено, що активність тимуліну *in vitro* залежить від концентрації цинку, що забезпечує активну конформацію гормону (DiSilvestro et al., 2021; Renata et al., 2023; Rizwan et al., 2025). Він є необхідним елементом трансформації претимуліну в тимулін (Reggiani et al., 2014). Так, у пацієнтів з гіпоцинкемією цей гормон перебуває в крові в «неактивній» конформа-

ції. Постачальником Zn^{2+} для тимуліну слугує металотіонеїн, який продукується ТЕК (Wang et al., 2024). Дефіцит цинку супроводжується поступовою атрофією тимуса та призводить до значного порушення процесів клітинного й гуморального імунітету (Акімов та ін., 2023; Renata et al., 2023; Rizwan et al., 2025). Прискорення інволюції тимуса, зменшення активності В- і Т-клітин спостерігається також у разі недостатності магнію (Fiorentini et al., 2021; Saglietti et al., 2023). Мідь має виражену імуномодуючу дію, що чітко виявлено в дослідженні первинної і вторинної імунної відповіді (Renata et al., 2023). Сполуки міді здатні збільшувати проліферацію повільно осідаючої фракції тимоцитів; порушення імунологічного статусу шляхом тимектомії призводить до негативного її балансу (Jin et al., 2023; Srivastava & Wanjari, 2024).

Враховуючи роль цинку, магнію та міді у функціонуванні тимуса, значний інтерес становить дослідження внесення солей цих металів на їх вміст у клітинах залози. Раніше такі дослідження не проводилися через брак досконалих методів цитохімічного визначення цинку, магнію та міді в клітинах виличкової залози. Розробка механізму цитохімічних реакцій 8-(паратолоуолсульфоніламіно)-хіноліну, люмомагнезону та люмокупферону в тимусних епітеліальних клітинах (ТЕК) дала можливість провести такі дослідження.

Мета дослідження – вивчити вплив сульфатів цинку, магнію та міді на вміст цих металів у ТЕК мишей і щурів.

Матеріал і методи

Матеріалом досліджень слугували зрізи виличкової залози білих безпородних 47 мишей і 49 щурів віком 6 місяців. Розчини сульфатів цинку та магнію вводили внутрішньочеревно в дозі 10 мг/кг ваги тіла, а розчин сульфату міді вводили в такий самий спосіб у дозі 5 мг/кг. У всіх експериментах 14 інтактних мишей і 16 інтактних щурів слугували контролем, тому що після дослідження контрольної групи тварин (тварини, яким вводили фізіологічний розчин) та інтактної групи (тварини без втручань) були отримані дані, які між собою статистично не відрізнялися. Тварин забивали декапітацією через 12 год після введення розчинів солей металів. У забитих мишей і щурів вилучали шматочки тимуса для проведення цитохімічних досліджень. Дослідження з використанням лабораторних тварин проводились згідно з вимогами ст. 26 Закону

України «Про захист тварин від жорстокого поводження», «Європейської конвенції про захист хребетних тварин» (Страсбург, 1986) та принципів біоетики.

Для цитохімічного визначення цинку шматочки залози фіксували в холодному (4 °C) ацетоні, а для цитохімічного визначення магнію та міді – у 70° холодному (4 °C) спирті, насиченому сірководнем. У випадку з постановкою цитохімічної реакції на цинк шматочки проводили через два ксилоли (по 15 хв у кожному), а у випадку з постановкою цитохімічних реакцій на магній і мідь – через спирти зростаючої міцності (80°, 90°, 96°, 100° – по 4 год у кожному). Потім була стандартна процедура проведення шматочків тимуса через суміш 50% ксилолу та 50 % парафіну (30 хв за +40 °C), два рідкі парафіни (по 1,5 год у кожному за +56 °C) з подальшою заливкою в парафін. Парафінові зрізи 10 мкм завтовшки обробляли двома ксилолами та спиртами (по 3 хв у кожному). Парафінові зрізи 5–10 мкм завтовшки обробляли двома ксилолами та спиртами (по 3 хв у кожному). У випадку постановки цитохімічної реакції на цинк зрізи забарвлювали 0,1%-м спиртовим розчином 8-(п-толуолсульфоніламіно)-хіноліну (8-TSX), на магній – 1%-м водним розчином люмомагнезону (ЛМ), мідь – 0,1%-м водним розчином люмокупферону (ЛК). Забарвлені зрізи промивали дистильованою водою, замикали в гліцерин, масляну імерсію та розглядали під люмінесцентним мікроскопом (світлофільтри ФС-1, ЖС-18). На препаратах у тимусних епітеліальних клітинах визначалася жовто-зелена люмінесценція

(показник вмісту цинку в клітинах) і рожева люмінесценція (показник вмісту магнію в клітинах). Під люмінесцентним мікроскопом мідь також виявлялася за жовто-зеленим світінням.

Вміст магнію та міді оцінювали за інтенсивністю флуоресценції клітин і виражали в ум. од., а вміст цинку – в мкг/г. Експериментальні дані обробляли за допомогою t-критерію Стьюдента, що пояснюється нормальним характером розподілу варіант у вибірках (критерій Колмогорова – Смирнова, Statistica, 6.0). Обчислювали коефіцієнт кореляції Пірсона (r) для оцінки ступеня зв'язку між змінами досліджених показників.

Результати й обговорення

Було встановлено, що під впливом сульфату цинку в тимусі мишей збільшувався вміст цинку на 32% ($P < 0,01$), магнію – на 24% ($P < 0,05$) і знижувалася кількість міді на 43% ($P < 0,001$). Після дії сульфату магнію підвищення вмісту цинку та магнію становило відповідно 22% ($P < 0,05$) і 37% ($P < 0,01$), а зниження рівня міді – 28% ($P < 0,01$). У тварин, які отримали сульфат міді, відмічалася зниження вмісту внутрішньоклітинних цинку та магнію на 39% ($P < 0,001$) і 25% ($P < 0,05$) та збільшення вмісту міді на 43% ($P < 0,001$) (табл. 1).

Подібні зміни вмісту, магнію та міді в клітинах виличкової залози спостерігались у щурів, яким вводили солі цих металів (табл. 2).

Уведення сульфату цинку щурам викликало в клітинах епітелію тимуса збільшення вмісту цинку на 40% ($P < 0,01$), магнію –

Таблиця 1

Вміст цинку, магнію та міді в ТЕК ($M \pm m$) і їх взаємозв'язок (r) у мишей за умов введення солей цинку, магнію та міді

Група тварин	Метод 8-TSX, мкг/г	Метод ЛМ, ум. од.	Метод ЛК, ум. од.	r_1	r_2	r_3
Контроль (n = 14)	41 ± 3,4	67 ± 5,0	58 ± 4,2	0,56*	-0,75**	-0,81***
Тварини, які отримали сульфат цинку (n = 10)	54 ± 2,9**	83 ± 5,8*	33 ± 1,7***	0,50*	-0,80***	-0,40*
Тварини, які отримали сульфат магнію (n = 12)	50 ± 2,1*	92 ± 6,7**	42 ± 2,5**	0,42*	-0,91***	-0,40*
Тварини, які отримали сульфат міді (n = 11)	25 ± 1,7***	50 ± 4,2*	83 ± 5,8***	0,60*	-0,43*	-0,54*

Примітка: тут і далі: * – $P < 0,05$; ** – $P < 0,01$; *** – $P < 0,001$ порівняно з контролем; r_1 – коефіцієнт кореляції змін вмісту цинку та магнію в ТЕК; r_2 – коефіцієнт кореляції змін вмісту цинку та міді в ТЕК; r_3 – коефіцієнт кореляції змін вмісту магнію та міді в ТЕК.

Таблиця 2

Вміст цинку, магнію та міді в ТЕК ($M \pm m$) і їх взаємозв'язок (r) у щурів за умов введення солей цинку, магнію та міді

Група тварин	Метод 8-ТСХ, мкг/г	Метод ЛМ, ум. од.	Метод ЛК, ум. од.	r_1	r_2	r_3
Контроль (n = 16)	50 ± 3,8	83 ± 5,8	42 ± 2,5	0,47*	-0,95***	-0,49*
Тварини, які отримали сульфат цинку (n = 10)	70 ± 4,6**	108 ± 7,5*	25 ± 3,3***	0,44*	-0,59*	-0,42*
Тварини, які отримали сульфат магнію (n = 12)	63 ± 2,5*	117 ± 9,2**	33 ± 1,7**	0,33*	-0,73**	-0,40*
Тварини, які отримали сульфат міді (n = 11)	29 ± 1,7***	58 ± 4,2***	58 ± 5,0**	0,62*	-0,62*	-0,97***

на 30% ($P < 0,05$) та зниження міді на 40% ($P < 0,001$). Після введення сульфату магнію зміни досліджених показників становили відповідно 26% ($P < 0,05$), 41 і 21% ($P < 0,01$). У випадку призначення тваринам сульфату міді відмічалася зниження рівня внутрішньоклітинного цинку на 42%, магнію – на 30% ($P < 0,001$) і підвищення вмісту міді на 38% ($P < 0,01$).

Отже, солі цинку та магнію викликають накопичення цих металів і зниження кількості міді в ТЕК мишей і щурів. Під впливом сульфату міді, навпаки, вміст цього металу збільшувався на тлі дефіциту цинку та магнію. Проведений кореляційний аналіз свідчить про достовірні позитивні зв'язки цинку та магнію та негативні – вказаних металів із міддю. Отримані дані також свідчать про синергійний характер взаємин у клітинах цинку й магнію, антагоністичні відносини – цинку й міді.

Уведення сульфату цинку тваринам викликає акумуляцію в клітинах значної частки цього металу в складі металотіонеїнів (МТ) – молекул специфічних білків, багатих на цистеїн. МТ є головним цинк-зв'язувальним білком, а цинк – його фізіологічним індуктором. МТ здатні зв'язуватися також з іншими металами. Мідь, що надходить з кров'ю через систему ворітної вени в гепатоцити, зв'язується спочатку МТ, знайденим у печінці людини та більшості тварин. Синтез МТ регулюється вмістом цинку та міді в печінці на рівні транскрипції мРНК. Утворення цього білка індукують обидва елементи, але цинк більш активний, а мідь формує більш стійкі комплекси з МТ.

Фізіологічний антагонізм міді та цинку розігрується на рівні МТ у процесі всмоктування. МТ відіграють значну роль у процесах росту, розвитку, проліферації і диференціювання клітин, головним чином у зв'язку з важливою роллю цинковмісних протеїнів у нормальному розвитку. МТ регулюють імунну функцію *in vivo* через зміни активності факторів транскрипції (Зайченко та ін., 2021; Kręzel & Maret, 2021).

Порівняльний аналіз власних результатів з іншими науковими дослідженнями засвідчує, що надмірне використання сульфату цинку для максимізації продуктивності свійських тварин може призвести до низької біодоступності інших мінералів, зокрема міді, що, зі свого боку, негативно впливає на метаболізм заліза (Xie et al., 2019). Взаємодію між міддю та цинком у раціоні, що визначалася концентрацією мікроелементів у тканинах, досліджували на самцях щурів лінії Sprague-Dawley. Отримані результати показують, що цинк у раціоні впливав на рівень міді в тканинах (мозок, яєчка, селезінка, серце, печінка, кишківник) переважно за дефіциту міді в раціоні, мідь у раціоні не впливала на цинк у тканинах, як дефіцит цинку, так і дефіцит міді впливали на рівень заліза в тканинах (Keen et al., 1985). В інших експериментах оцінювали вплив заміни сульфату цинку нижчим рівнем метіоніну цинку (ZnMet) на імунні функції відлучених поросят. Засвоюваність цинку ($P < 0,05$), вміст імуноглобуліну А ($P < 0,001$) та індекс тимуса ($P < 0,05$) збільшувалися, коли щонайменше 50% сульфату цинку замінювали на ZnMet (Xie et al.,

2019). Також на відлучених поросятах були проведені дослідження з метою визначення впливу рівня та джерела цинку на показники росту, концентрацію цинку в тканинах, внутрішньоклітинний розподіл цинку й імунну відповідь. Встановлено, що вага органів, концентрація та внутрішньоклітинний розподіл цинку в печінці, підшлунковій залозі та селезінці не залежали ($P = 0,12$) від рівня або джерела цинку (Heugten et al., 2003). Дослідження впливу низьких доз цинку [306 мкмоль (20 мг) /день] на імунологічні показники у людей похилого віку довели, що добавки цинку дали змогу частково, але значно відновити активність тимуліну в сироватці крові, а отже, тимчасовий статус без відомих недоліків високих доз цинку (Boukaiba et al., 1993).

Висновки

1. Встановлено, що вміст цинку в клітинах епітелію виличкової залози мишей і щурів достовірно збільшується після введення сульфату цинку на 32–40%, сульфату

магнію – на 22–26%, зменшується в разі введення сульфату міді на 39–42%.

2. У ТЕК тварин спостерігається вірогідне збільшення вмісту магнію після введення сульфату цинку на 24–30%, сульфату магнію – 37–41%, а також зниження вмісту цього металу в разі призначення сульфату міді на 25–30%.

3. Вміст міді в клітинах тимуса мишей і щурів достовірно зменшується після призначення сульфату цинку на 40–43%, сульфату магнію – на 21–28%, але збільшується в разі введення сульфату міді на 38–43%.

4. Позитивна кореляція змін вмісту цинку та магнію у досліджених клітинах тварин вказує на синергічний характер їх взаємин, а негативна кореляція змін вмісту цих металів із міддю – на їх антагоністичні відносини.

Перспективами подальших досліджень є вивчення впливу солей металів на їх вміст в інших клітинах імунної системи тварин.

Список використаної літератури

- Акімов О.Є., Кузнецова Т.Ю., Соловйова Н.В., Міщенко А.В., Заколадна О.Е., Соловйов В.В. Роль цинку в організмі людини та шляхи подолання його дефіциту. *Актуальні проблеми сучасної медицини. Вісник Української медичної стоматологічної академії*. 2023. Т. 23. № 3. С. 246–249. <https://doi.org/10.31718/2077-1096.23.3.246>.
- Зайченко Г.В., Горчакова Н.О., Шумейко О.В., Клименко О.В., Дорошенко А.І. Фармакологічні властивості препаратів цинку. *Український журнал медицини, біології та спорту*. 2021. Т. 6. № 3. С. 37–44. <https://doi.org/10.26693/jmbs06.03.037>.
- Abramson J., Anderson G. Thymic epithelial cells. *Annu. Rev. Immunol.* 2017. Vol. 35. P. 85–118. <https://doi.org/10.1146/annurev-immunol-051116-052320>.
- Boukaiba N., Flament C., Acher S., Chappuis P., Piau A., Fusselier M., Dardenne M., Lemonnier D. A physiological amount of zinc supplementation: effects on nutritional, lipid, and thymic status in an elderly population. *Am. J. Clin. Nutr.* 1993. Vol. 57. № 4. P. 566–572. <https://doi.org/10.1093/ajcn/57.4.566>.
- DiSilvestro R.A., Dardenne M., Joseph E. Comparison of thymulin activity with other measures of marginal zinc deficiency. *Biol. Trace Elem. Res.* 2021. Vol. 199. № 2. P. 585–587. <https://doi.org/10.1007/s12011-020-02159-y>.
- Fiorentini D., Cappadone C., Farruggia G., Prata C. Magnesium: biochemistry, nutrition, detection, and social impact of diseases linked to its deficiency. *Nutrients*. 2021. Vol. 13. № 4. P. 1–44. <https://doi.org/10.3390/nu13041136>.
- Heugten E., Spears J.W., Kegley E.B., Ward J.D., Qureshi M.A. *J. Anim. Sci.* 2003. Vol. 81. № 8. P. 2063–2071. <https://doi.org/10.2527/2003.8182063x>.
- Jin S., He L., Yang C., He X., Chen H., Feng Y., Tang W., Li J., Liu D., Li T. Crosstalk between trace elements and T-cell immunity during early-life health in pigs. *Sci. China Life Sci.* 2023. Vol. 66. № 9. P. 1994–2005. <https://doi.org/10.1007/s11427-022-2339-0>.
- Keen C.L., Reinstein N.H., Goudey-Lefevre J., Lefevre M., Lönnerdal B., Schneeman B.O., Hurley L.S. Effect of dietary copper and zinc levels on tissue copper, zinc, and iron in male rats. *Biol. Trace Elem. Res.* 1985. Vol. 8. № 2. P. 123–136. <https://doi.org/10.1007/BF02917466>.
- Kiouri D.P., Tsoupra E., Peana M., Perlepes S.P., Stefanidou M.E., Chasapis C.T. Multifunctional role of zinc in human health: an update. *EXCLI J.* 2023. Vol. 22. № 4. P. 809–827. <https://doi.org/10.17179/excli2023-6335>.
- Kreżel A., Maret W. The Bioinorganic Chemistry of Mammalian Metallothioneins. *Chem. Rev.* 2021. Vol. 121. № 23. P. 14594–14648. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00371>.

- Prykhodko O., Avilova O., Dmytruk S., Ponyrko A., Gordienko O., Prykhodko E. Histoultrastructural features of thymocytes due to the impact of the experimental general dehydration of a mild degree. *Wiad. Lek.* 2023. Vol. 76. № 8. P. 1709–1716. <https://doi.org/10.36740/WLek202308101>.
- Reggiani P., Morel G., Console G.M., Barbeito C.G., Rodriguez S.S., Brown O.A., Bellini M.J., Pléau J., Dardenne M., Goya R. The thymus-neuroendocrine axis: physiology, molecular biology, and therapeutic potential of the thymic peptide thymulin. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 2009. Vol. 1153. P. 98–106. <https://doi.org/10.2174/1381612820666140130211157>.
- Reggiani P.C., Schwerdt J.I., Console G.M., Roggero E.A., Dardenne M., Goya M.R. Physiology and therapeutic potential of the thymic peptide thymulin. *Curr. Pharm. Des.* 2014. Vol. 20. № 29. P. 4690–4696. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2008.03964.x>.
- Renata R.N., Arely G.A., Gabriela L.A., Esther M.M. Immunomodulatory role of microelements in COVID-19 outcome: a relationship with nutritional status. *Biol. Trace Elem. Res.* 2023. Vol. 201. № 4. P. 1596–1614. <https://doi.org/10.1007/s12011-022-03290-8>.
- Rizwan M., Cheng K., Gang Y., Hou Y., Wang C. Immunomodulatory effects of vitamin d and zinc on viral infection. *Biol. Trace Elem. Res.* 2025. Vol. 203. № 1. P. 1–17. <https://doi.org/10.1007/s12011-024-04139-y>.
- Saglietti F., Girombelli A., Marelli S., Vetrone F., Balzanelli M. G., Tabae Damavandi P. Role of magnesium in the intensive care unit and immunomodulation: a literature review. *Vaccines (Basel)*. 2023. Vol. 11. № 6. P. 1112–1122. <https://doi.org/10.3390/vaccines11061122>.
- Srivastava T., Wanjari N. Copper and its isotopes: a brief overview of its implications in geology, environmental system, and human health. *Isotopes Environ. Health Stud.* 2024. Vol. 60. № 6. P. 642–667. <https://doi.org/10.1080/10256016.2024.2410290>.
- Wang X., Zhang M., Ma J., Tie Y., Wang S. Biochemical markers of zinc nutrition. *Biol. Trace Elem. Res.* 2024. Vol. 202. № 12. P. 5328–5338. <https://doi.org/10.1007/s12011-024-04091-x>.
- Xie Y., Zhang Q., Wang L., Wang Y., Cheng Zh., Yang Z., Yang W. The effects of partially or completely substituted dietary zinc sulfate by lower levels of zinc methionine on growth performance, apparent total tract digestibility, immune function, and visceral indices in weaned piglets. *Animals (Basel)*. 2019. Vol. 9. № 5. P. 236. <https://doi.org/10.3390/ani9050236>.

References

- Akimov, O.Ye., Kuznetsova, T.Yu., Soloviova, N.V., Mishchenko, A.V., Zakolodna, O.E., & Soloviov, V.V. (2023). Rol tsynku v orhanizmi liudyny ta shliakhy podolannia yoho defitsytu [The role of zinc in the human body and ways to overcome its deficiency]. *Aktualni problemy suchasnoi medytsyny: Visnyk Ukrainskoi medychnoi stomatolohichnoi akademii* [Current problems of modern medicine: Bulletin of the Ukrainian Medical Stomatological Academy], 23 (3), 246–249. <https://doi.org/10.31718/2077-1096.23.3.246> [in Ukrainian].
- Zaichenko, H.V., Horchakova, N.O., Shumeiko, O.V., Klymenko, O.V., & Doroshenko, A.I. (2021). Farmakolohichni vlastyvoli preparativ tsynku [Pharmacological properties of zinc preparations]. *Ukrainskyi zhurnal medytsyny, biolohii ta sportu* [Ukrainian Journal of Medicine, Biology and Sports], 6 (3), 37–44. <https://doi.org/10.26693/jmbs06.03.037> [in Ukrainian].
- Abramson, J., Anderson, G. (2017). Thymic epithelial cells. *Annu. Rev. Immunol.*, 35, 85–118. <https://doi.org/10.1146/annurev-immunol-051116-052320> [in English].
- Boukaiba, N., Flament, C., Acher, S., Chappuis, P., Piau, A., Fusselier, M., Dardenne, M., Lemonnier, D. (1993). A physiological amount of zinc supplementation: effects on nutritional, lipid, and thymic status in an elderly population. *Am. J. Clin. Nutr.*, 57 (4), 566–572. <https://doi.org/10.1093/ajcn/57.4.566> [in English].
- DiSilvestro, R.A., Dardenne, M., & Joseph, E. (2021). Comparison of thymulin activity with other measures of marginal zinc deficiency. *Biol. Trace Elem. Res.*, 199 (2), 585–587. <https://doi.org/10.1007/s12011-020-02159-y> [in English].
- Fiorentini, D., Cappadone, C., Farruggia, G., & Prata, C. (2021). Magnesium: biochemistry, nutrition, detection, and social impact of diseases linked to its deficiency. *Nutrients*, 13 (4), 1–44. <https://doi.org/10.3390/nu13041136> [in English].
- Heugten, E., Spears, J.W., Kegley, E.B., Ward, J.D., Qureshi, M.A. (2003). *J. Anim. Sci.*, 81 (8), 2063–2071. <https://doi.org/10.2527/2003.8182063x> [in English].
- Jin, S., He, L., Yang, C., He, X., Chen, H., Feng, Y., Tang, W., Li, J., Liu, D., & Li, T. (2023). Crosstalk between trace elements and T-cell immunity during early-life health in pigs. *Sci. China Life Sci.*, 66 (9), 1994–2005. <https://doi.org/10.1007/s11427-022-2339-0> [in English].

- Keen, C.L., Reinstein, N.H., Goudey-Lefevre, J., Lefevre, M., Lönnerdal, B., Schneeman, B.O., Hurley, L.S. (1985). Effect of dietary copper and zinc levels on tissue copper, zinc, and iron in male rats. *Biol. Trace Elem. Res.*, 8 (2), 123–136. <https://doi.org/10.1007/BF02917466> [in English].
- Kiouri, D.P., Tsoupra, E., Peana, M., Perlepes, S.P., Stefanidou, M.E., & Chasapis, C.T. (2023). Multifunctional role of zinc in human health: an update. *EXCLI J*, 22 (4), 809–827. <https://doi.org/10.17179/excli2023-6335> [in English].
- Kreżel, A., & Maret, W. (2021). The Bioinorganic Chemistry of Mammalian Metallothioneins. *Chem. Rev.*, 121 (23), 14594–14648. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00371>.
- Prykhodko, O., Avilova, O., Dmytruk, S., Ponyrko, A., Gordienko O., & Prykhodko E. (2023). Histoultrastructural features of thymocytes due to the impact of the experimental general dehydration of a mild degree. *Wiad. Lek.*, 76 (8), 1709–1716. <https://doi.org/10.36740/WLek202308101> [in English].
- Reggiani, P.C., Schwerdt, J.I., Console, G.M., Roggero, E.A., Dardenne, M., & Goya, M.R. (2014). Physiology and therapeutic potential of the thymic peptide thymulin. *Curr. Pharm. Des.*, 20 (29), 4690–4696. <https://doi.org/10.2174/1381612820666140130211157> [in English].
- Reggiani, P., Morel, G., Console, G.M., Barbeito, C.G., Rodriguez, S.S., Brown O.A., Bellini, M.J., Pléau, J., Dardenne, M., & Goya, R. (2009). The thymus-neuroendocrine axis: physiology, molecular biology, and therapeutic potential of the thymic peptide thymulin. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 1153, 98–106. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2008.03964.x> [in English].
- Renata, R.N., Arely, G.A., Gabriela, L.A., & Esther, M.M. (2023). Immunomodulatory role of microelements in COVID-19 outcome: a relationship with nutritional status. *Biol. Trace Elem. Res.*, 201 (4), 1596–1614. <https://doi.org/10.1007/s12011-022-03290-8> [in English].
- Rizwan, M., Cheng, K., Gang, Y., Hou, Y., & Wang, C. (2025). Immunomodulatory effects of vitamin d and zinc on viral infection. *Biol. Trace Elem. Res.*, 203 (1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s12011-024-04139-y> [in English].
- Saglietti, F., Girombelli, A., Marelli, S., Vetrone, F., Balzanelli, M.G., & Tabae Damavandi, P. (2023). Role of magnesium in the intensive care unit and immunomodulation: a literature review. *Vaccines (Basel)*, 11 (6), 1112–1122. <https://doi.org/10.3390/vaccines11061122> [in English].
- Srivastava, T., & Wanjari, N. (2024). Copper and its isotopes: a brief overview of its implications in geology, environmental system, and human health. *Isotopes Environ. Health Stud.*, 60 (6), 642–667. <https://doi.org/10.1080/10256016.2024.2410290> [in English].
- Wang, X., Zhang, M., Ma, J., Tie, Y., & Wang, S. (2024). Biochemical markers of zinc nutrition. *Biol. Trace Elem. Res.*, 202 (12), 5328–5338. <https://doi.org/10.1007/s12011-024-04091-x> [in English].
- Xie, Y., Zhang, Q., Wang, L., Wang, Y., Cheng, Zh., Yang, Z., Yang, W. (2019). The effects of partially or completely substituted dietary zinc sulfate by lower levels of zinc methionine on growth performance, apparent total tract digestibility, immune function, and visceral indices in weaned piglets. *Animals (Basel)*, 9 (5), 236. <https://doi.org/10.3390/ani9050236> [in English].

Отримано: 24.04.2025
Прийнято: 15.05.2025



УДК 582:556.51(477.51)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.5>

СИСТЕМАТИЧНА СТРУКТУРА ФЛОРИ ВОДНИХ ТА ПРИБЕРЕЖНО-ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ МАЛИХ РІЧОК ПОНИЗЗЯ ДЕСНИ

Т. І. Івусь¹, Ю. О. Карпенко²

Актуальність дослідження флори малих річок пониззя Десни зумовлена необхідністю проведення аналізу фіторозмаїття екосистем, які зазнають значного антропогенного впливу та демонструють високу екологічну вразливість. Малі водотоки відіграють ключову роль у функціонуванні ландшафтів Полісся, забезпечують підтримання гідрологічного режиму, стабільність локальних біоценозів і збереження рідкісних і гідрологічних видів. Зміна клімату, інтенсифікація господарської діяльності, урбанізація і осушення територій призводять до значного збіднення видового складу флори. У зв'язку із цим вивчення флори водних і прибережно-водних ценозів набуває особливого значення для обґрунтування заходів з охорони та відновлення природних екосистем. Метою дослідження є проведення комплексного аналізу систематичної структури флори водних і прибережно-водних екосистем малих річок пониззя Десни, ідентифікація таксономічного розмаїття та з'ясування рівня синантропізації.

В основу роботи покладені матеріали польових досліджень у період 2016–2023 років, які здійснюються в межах Любецько-Чернігівського та Дніпровсько-Нижньодеснянського фізико-географічних районів Чернігівського Полісся. Польові дослідження проводилися напівстаціонарним і маршрутним методами вздовж русел малих річок, з обов'язковим опрацюванням гербарного матеріалу й літературних джерел. Номенклатура таксонів наведена відповідно до Plants of the World Online. Наукова новизна роботи полягає в наведеному комплексному структурно-порівняльному аналізі флори малих річок пониззя Десни, з визначенням провідних родів і родин, структурних закономірностей, рівня синантропізації та екологічної трансформації флористичного складу. Зібрані матеріали дозволяють сформулювати уявлення про екологічний стан водних екосистем регіону та можуть слугувати базою для подальших досліджень.

Практична значущість результатів полягає в можливості їх використання у природоохоронному плануванні, моніторингу змін біорозмаїття, підготовці програм з відновлення деградованих територій, а також в освітньо-науковій роботі з формування екологічної свідомості місцевого населення.

Ключові слова: макрофіти, басейн Десни, систематична структура, розмаїття судинних рослин.

¹ аспірант кафедри екології, географії та природокористування
(Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка, м. Чернігів)
e-mail: tanya-ivus@ukr.net
ORCID: 0000-0002-6993-611X

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

ANALYSIS OF THE SYSTEMATIC STRUCTURE OF THE FLORA OF WATER AND COASTAL-WATER ECOSYSTEMS OF SMALL RIVERS OF THE DESNA RIVER LOWER REACHES

T. I. Ivus, Yu. O. Karpenko

The relevance of studying the flora of small rivers in the lower Desna is due to the need to analyze the phytodiversity of ecosystems that are subject to significant anthropogenic impact and demonstrate high ecological vulnerability. Small watercourses play a key role in the functioning of the landscapes of Polissia, ensuring the maintenance of the hydrological regime, the stability of local biocenoses and the preservation of rare and hydrological species. Climate change, intensification of economic activity, urbanization and drainage of territories lead to a significant impoverishment of the species composition of the flora. In this regard, the study of the flora of aquatic and coastal aquatic coenoses is of particular importance for substantiating measures for the protection and restoration of natural ecosystems. The purpose of the study is a comprehensive analysis of the systematic structure of the flora of aquatic and coastal aquatic ecosystems of small rivers in the lower Desna, identification of taxonomic diversity and clarification of the level of synanthropization. The work is based on field materials from 2016–2023, carried out within the boundaries of the Lyubetsko-Chernihiv and Dniprovsko-Nizhnyodesny physical and geographical regions of Chernihiv Polissia. Field surveys were conducted by semi-stationary and route methods along the beds of small rivers, with mandatory processing of herbarium material and literary sources. The nomenclature of taxa is given in accordance with Plants of the World Online. The scientific novelty of the work lies in the presented comprehensive structural and comparative analysis of the flora of small rivers of the lower Desna, with the determination of leading genera and families, structural patterns, the level of synanthropization and ecological transformation of the floristic composition. The collected materials allow us to form an idea of the ecological state of the region's aquatic ecosystems and can serve as a basis for further research. The practical significance of the results lies in the possibility of their use in environmental planning, monitoring of biodiversity changes, preparation of programs for the restoration of degraded areas, as well as in educational and scientific work to form the environmental awareness of the local population.

Key words: *macrophytes, Lower Desna basin, taxonomic structure, vascular plant diversity.*

Вступ

Однією із проблем у галузі охорони природних екосистем є охорона та відновлення малих водних об'єктів. Невелика водоносність малих річок і швидке реагування водного режиму на кліматичні умови на водозборі, високий ступінь залежності будови та властивості їхніх русел від місцевих чинників визначають особливу чутливість цих річок до всіх змін зовнішніх умов, спричинених як зміною природних чинників, так і антропогенними впливами. Будь-яке з них може призвести до серйозних, часто незворотних трансформацій русла малої річки, аж до його цілковитої деградації, і водночас абсолютно не позначитися на русловому режимі та стані русел середніх річок, а великих і погігтів (Клименко, 2020).

За фізико-географічним районуванням територія дослідження належить до Любецько-Чернігівського та Дніпровсько-Нижньодеснянського районів області Чернігівського Полісся, зони мішаних (хвойно-широколистяних) лісів (Андрієнко та ін., 2006).

У межах регіону дослідження протяжність малих річок басейну Десни стано-

вить 4 768 км. Гідрологічна сітка регіону дослідження представлена дев'ятьма річками, як-от: Вздвижа (довжиною у 31 км), Золотинка (18 км), Вереб (Старуха) (18 км), Жевідь (22 км), Смолянка (42 км), Махнея (19 км), Меша (28 км), Любич (4 км), Любич-2 (9 км).

Більшість малих річок регіону дослідження мають невеликі похили, широкі та слабкозаглиблені долини, характеризуються поступовим переходом від інтенсивно заболочених заплав і надзаплавних терас до низьких і часто заболочених вододілів, не вирізняються значною течією, русла низки річок виражені нечітко, тому часто зливаються із прилеглими болотами, частина малих річок цілком або частково є магістральними каналами меліоративних систем, які були створені в період 50–70-х рр. ХХ ст.

Аналіз сучасного наукового доробку (Цюсю та ін., 2018; Клименко, 2020; Івусь, 2020; Яковенко, 2022; Мехед і Кирієнко, 2023; Свердлов, 2024; Мехед і Карпенко, 2024) та узагальнювальних праць (Андрієнко та ін., 2006; Дубина, 2006; Чорна, 2006; Лукаш і Андрієнко, 2014) свідчить про відсутність

систематизованих і комплексних досліджень водної та прибережно-водної рослинності в межах гідрологічної мережі південно-східної частини Полісся Чернігівщини. З огляду на фрагментарність і випадковість наявних даних, дослідження спрямовано на всебічний аналіз фітоценозів поліської частини регіону з метою доповнення наявної наукової бази новими емпіричними матеріалами.

Тому актуальність проведених нами досліджень флори водних і прибережно-водних екосистем регіону зумовлена необхідністю інвентаризації таксономічного багатства екосистем малих річок пониззя Десни, оскільки вони є складними комплексами, відіграють важливу роль у збереженні фіторозмаїття, що потребує охорони та відтворення в межах регіону досліджень. Метою дослідження є вивчення флори водних і прибережно-водних екосистем малих річок пониззя Десни, оцінювання видової та родової різноманітності, а також аналіз впливу антропогенних чинників на флору.

Для досягнення даної мети було поставлено такі завдання: провести інвентаризацію флори водних і прибережно-водних екосистем малих річок пониззя Десни; навести основні таксономічні групи рослин; дослідити видовий склад і родове розмаїття флори; визначити відношення кількості видів, родів і родин у досліджуваних екосистемах; проаналізувати таксономічну структуру флори; виявити характерні закономірності розподілу рослинних видів за різними систематичними категоріями.

Матеріал і методи

Систематичний аналіз флори водних і прибережно-водних екосистем малих річок пониззя Десни здійснено на основі польових досліджень напівстаціонарним, детально-маршрутним методами, протягом 2016–2023 рр. (Мусієнко, 2005). Маршрути пролягали переважно вздовж русла річок у межах населених пунктів та поза ними.

Конспект флори було складено на основі обробки результатів власних досліджень, аналізу літературних джерел і опрацювання матеріалів гербарної колекції Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка (далі – НУЧК імені Т.Г. Шевченка). Для визначення видів флори та таксонів різних рангів фітобіоти малих річок використовували визначники й електронні бази ідентифікації (Mosyakin & Fedoronchuk, 1999; Чорна, 2001; Plants ..., 2025). Гербарій флори малих річок пониззя

Десни, зібраний під час польових досліджень, зберігається в гербарній колекції НУЧК імені Т.Г. Шевченка.

Результати та їх обговорення

Систематична структура флори визначається А.І. Толмачовим як «властивий кожній флорі розподіл видів між систематичними категоріями вищого рангу» (Оптасюк і Любінська, 2017). Головними її показниками є співвідношення різних груп судинних рослин, що виражається у відсотках загального числа видів, родів і родин; у розподілі видів між таксонами різного рівня; у кількісному складі родин і родів, що мають у флорі панівне становище; у співвідношенні між кількістю видів у різних родин і родах. Отримані кількісні показники порівнюються з такими для іншої флори, що виявляє ботаніко-географічні закономірності рослинного світу.

Важливим кількісним показником будь-якої флори є флористичне багатство, рівень якого визначається кількістю видів, родів і родин.

Складений нами конспект флори малих річок пониззя Десни налічує 293 види, які належать до 207 родів, 61 родини і 3 відділів.

Особливістю досліджуваної флори є незначна кількість судинних спорових рослин (3 види, або 1,8%).

Найбільш представлений у видовому складі відділ *Magnoliophyta*, який налічує 287 видів (97,9% від загальної кількості видів), з них до *Liliopsida* належить 71 вид (24,2%), до *Magnoliopsida* – 216 видів (73,7%).

Для флори водних і прибережно-водних екосистем малих річок пониззя Десни пропорція становить 1: 3,4 : 4,8, середні числа видів у родині 4,8, а в роді – 1,41 (табл. 1).

Низькими пропорціями представлені відділи вищих рослин *Equisetophyta*, *Polypodiophyta*, 1 : 1 : 3 й 1 : 1 : 1 відповідно. Найвищою є пропорція класу *Magnoliopsida*, що становить 1 : 3,8 : 5,3.

Таксономічний аналіз показав, що розподіл видів у родині є нерівномірним. Розподіл родин регіональної флори й земної кулі загалом підлягає логарифмічній закономірності.

Домінування небагатьох родин типова ознака більшості регіональної природної флори, зокрема і флори Голарктики.

Найбільш показовими для характеристики флори будь-яких територій є флористичні спектри провідних родин, що відображають головні властивості флори (табл. 2). Для флори Голарктики характерно те, що

Таблиця 1

Основні пропорції флори водних і прибережно-водних екосистем малих річок
понижззя Десни

Назва відділу, класу		Кількість родин		Кількість родів		Кількість видів		Пропорції флори	
		абс. к-ть	%	абс. к-ть	%	абс. к-ть	%	родини: роди : види	родовий коефіцієнт
Equisetophyta		1	1,6	1	0,5	3	1	1 : 1 : 3	3
Polypodiophyta		3	4,9	3	1,4	3	1	1 : 1 : 1	1
Magnoliophyta		57	93,4	203	98,1	287	97,9	1 : 3,6 : 5	1,41
з них:	Liliopsida	16	26,2	46	22,2	71	24,2	1 : 2,9 : 4,4	1,54
	Magnoliopsida	41	67,2	157	75,9	216	73,7	1 : 3,8 : 5,3	1,38
Усього		61	100	207	100	293	100	1 : 3,4 : 4,8	1,41

Таблиця 2

Спектр провідних родин флори водних і прибережно-водних екосистем малих річок
понижззя Десни

№	Назва родини	Кількість видів		Кількість родів	
		абс. к-ть	% від загальної кількості видів	абс. к-ть	% від загальної кількості родів
1.	<i>Asteraceae</i>	44	15,1	31	14,9
2.	<i>Poaceae</i>	27	9,2	19	9,2
3–4.	<i>Lamiaceae</i>	15	5,1	14	6,8
3–4.	<i>Caryophyllaceae</i>	15	5,1	13	6,3
5.	<i>Fabaceae</i>	14	4,8	10	4,8
6.	<i>Brassicaceae</i>	13	4,4	10	4,8
7.	<i>Cyperaceae</i>	12	4,1	5	2,4
8.	<i>Ranunculaceae</i>	10	3,4	6	2,9
9–12.	<i>Apiaceae</i>	9	3,1	8	3,9
9–12.	<i>Rosaceae</i>	9	3,1	6	2,9
9–12.	<i>Boraginaceae</i>	9	3,1	8	3,9
9–12.	<i>Polygonaceae</i>	9	3,1	3	1,4
	Усього	293	100	207	100

переважна кількість видів зосереджена в десяти провідних родин. До складу провідних родин належать 186 видів (63,5%) і 139 родів (67,1%) досліджуваної флори.

Перше місце посідає родина *Asteraceae* (44 види, або 15,1%). Висока позиція у спектрі закономірна для більшості флори помірної частини всієї Голарктики.

Друга позиція в родини *Poaceae* – 27 видів, або 9,2%, що також вказує на бореальний характер флори.

Родина *Lamiaceae*, що налічує 15 видів (5,1%) – на третьому місці в досліджуваній флорі, яка за походженням є субтропічною, проте містить багато неморальних видів.

Родина *Caryophyllaceae* (15 видів, 5,1%) також є субтропічною за походженням, проте поширена в помірній зоні.

На п'ятому місці родина *Fabaceae* – 14 видів (4,8%), яка вказує на близькість до південних, середземноморських помірно теплих флор.

Висока позиція родини *Brassicaceae* – 13 видів (4,4%) – свідчить про порівняно низький ступінь синантропізації флори.

Сьоме місце в родини *Cyperaceae*, яка представлена 10 видами (3,4%), види родини притаманні в основному природним перезволоженим екотопам, також вказує на кореальний характер флори регіону дослідження.

Родина *Ranunculaceae* – на восьмому місці, 10 видів (3,3%), також є кореальною родиною.

З дев'ятого по дванадцяте місце в родин *Apiaceae*, *Rosaceae*, *Boraginaceae*,

Polygonaceae – по 9 видів, що становить 3,1%, що загалом характерно для зональних флор. Родини *Apiaceae*, *Boraginaceae* типові для аридних територій.

Флора водних і прибережно-водних екосистем пониззя Десни, що охоплює південно-східну частину Чернігівського Полісся в межах Любецько-Чернігівського та Дніпровсько-Нижньодеснянського фізико-географічних районів, відображає типовий для регіону перехідний характер із домінуванням бореальних, частково аональних елементів. Провідні родини, як-от *Asteraceae*, *Poaceae*, *Cyperaceae* та *Ranunculaceae*, мають бореальне походження і адаптовані до вологих, заболочених, прохолодних умов, характерних для поліських ландшафтів. Водночас наявні такі родини, як *Lamiaceae*, *Fabaceae*, *Rosaceae* та *Caryophyllaceae*, які мають південні ареали поширення, що зумовлено географічним розташуванням регіону досліджень.

Характеристику особливостей флори дають також співвідношення кількості видів в окремих родин. Відношення кількості видів *Asteraceae* до *Fabaceae* становить 3,1 і є типовим для флор бореальних областей, *Asteraceae* до *Cyperaceae* – 3,7, що також характерно для співвідношень у бореальних флорах.

Родинний спектр відображає найбільш фундаментальні особливості флори. М.Г. Попов стверджує, що чим нижчий ранг таксономічної одиниці, тим більш залежна вона від умов довкілля і більш чутливо реагує на його зміни.

Найвищим видовим розмаїттям в дослідженій флорі характеризується бореальний рід *Carex*, який містить 6 видів, або 2,1% від загальної кількості видів флори (табл. 3).

Роди *Artemisia* та *Rumex* представлені 5 представниками (1,7% кожний). Роди *Potamogeton*, *Ranunculaceae*, *Galium* налічують по 4 види, що становить 1,4% від загальної кількості видів.

Роди *Equisetum*, *Lemna*, *Poa*, *Bidens*, *Inula*, *Cuscuta*, *Euphorbia*, *Trifolium*, *Plantago*, *Persicaria*, *Potentilla*, *Veronica* представлені 3 видами кожний, що становить 1,02% від загальної кількості.

Загалом до спектра перших десяти родів належать переважно бореальні роди й роди різного географічного поширення, що вказує на бореальний характер флори.

Досліджувана флора характеризується значним ступенем синантропізації, оскільки в її складі наявний 71 (47,9%) синантропний вид (згідно зі списком В.В. Протопопової), із яких 22 види є адвентивними, зокрема 12 – кенофіти, спостерігається тенденція

Таблиця 3
Спектр провідних родів флори водних і прибережно-водних екосистем малих річок пониззя Десни

№	Назва роду	Кількість видів	% від загальної кількості видів
1.	<i>Carex</i>	6	2,1
2.	<i>Artemisia</i>	5	1,7
3.	<i>Rumex</i>	5	1,7
4–6.	<i>Potamogeton</i>	4	1,4
4–6.	<i>Ranunculaceae</i>	4	1,4
4–6.	<i>Galium</i>	4	1,4
7–18.	<i>Equisetum</i>	3	1,02
7–18.	<i>Lemna</i>	3	1,02
7–18.	<i>Poa</i>	3	1,02
7–18.	<i>Bidens</i>	3	1,02
7–18.	<i>Inula</i>	3	1,02
7–18.	<i>Cuscuta</i>	3	1,02
7–18.	<i>Euphorbia</i>	3	1,02
7–18.	<i>Trifolium</i>	3	1,02
7–18.	<i>Plantago</i>	3	1,02
7–18.	<i>Persicaria</i>	3	1,02
7–18.	<i>Potentilla</i>	3	1,02
7–18.	<i>Veronica</i>	3	1,02

Таблиця 4

Структура синантропної компоненти вищої флори малих річок пониззя Десни

Екотип	Водна флора			Навколоводна флора	
Група синантропних рослин	гідрофіти	гелофіти	гірогелофіти	гірофіти	гіромезофіти
Апофіти	–	–	–	9	24
Адвенти	1	1	1	4	15
Археофіти	–	–	1	2	1
Кенофіти	1	1	–	1	9
Усього	2	2	2	16	49
	6			65	

різкого зростання синантропних видів від екотипів водної флори до екотипів навколоводної флори (табл. 4).

Висновки

Отже, флора водних і прибережно-водних екосистем малих річок пониззя Десни характеризується досить значною видовою та родовою розмаїтістю, що підтверджується таксономічними спектрами провідних родів і родин. Конспект досліджуваної флори налічує 293 види, що належать до 207 родів, 61 родини та 3 відділів. Серед найбільш представлених у видовому складі відділів *Magnoliophyta* – 287 видів (97,9% від загальної кількості видів), з них до *Liliopsida* належить 71 вид

(24,2%), до *Magnoliopsida* – 216 видів (73,7%).

Здійснений структурно-порівняльний аналіз систематичної структури флори водних і прибережно-водних екосистем малих річок пониззя Десни показав, що вона більше тяжіє до бореальної групи флори, що визначається природно-географічними умовами території досліджень та гідроекологічними особливостями системи малих річок. Отже, унаслідок високого положення провідних таксонів *Asteraceae*, *Carex* спостерігається часткова трансформація систематичної структури, як результат антропогенного впливу, що підтверджується виявленням 71 синантропного виду.

Список використаної літератури

- Дубина Д.В. Вища водна рослинність : монографія. Київ : Фітосоціоцентр, 2006. 412 с.
- Івусь Т.І. Систематична, екобіоморфологічна структура та соціологічна цінність флори водних і прибережно-водних екосистем річки Золотинка (Чернігівська область). *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка*. Серія «Біологія». 2020. Вип. 1–2 (79). С. 12–17. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.20.1-2.2>.
- Клименко О.М. Вища водна рослинність як індикатор екологічного стану гідроекосистеми (на прикладі річки Вижівка). *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. Серія «Сільськогосподарські науки». 2020. № 2 (90). С. 72–82.
- Лукаш О.В., Андрієнко Т.А. Ботанічно цінні рослинні угруповання Полісся. Чернігів : Десна Поліграф, 2014. 156 с.
- Мехед О.Б., Карпенко Ю.О. Прибережно-водна рослинність заплави річки Снов як компонент рекреаційно-реабілітаційного середовища. *Вісник Черкаського університету*. Серія «Біологічні науки». 2024. Вип. 1. С. 112–120. <https://doi.org/10.31651/2076-5835-2018-1-2024-1-112-120>.
- Мехед О.Б., Кирієнко С.В. Водні та прибережно-водні фітоценози гідрологічної мережі північних регіонів Чернігівщини. *Науковий вісник Ужгородського університету*. Серія «Біологія». 2023. Вип. 54. С. 99–103. <https://doi.org/10.32782/1998-6475.2023.54.99-103>.
- Мусієнко М.М. Методи дослідження вищих водних рослин : навчальний посібник. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2005. 60 с.
- Оптасюк О.М., Любінська Л.Г. Аналіз систематичної структури флори водних та болотних екосистем Поділля. *Науковий вісник Чернівецького університету*. Серія «Біологія (Біологічні системи)». 2017. № 1 (9). С. 123–128.
- Свердлов В.О. Водні, прибережно-водні та заплавні біотопи території РЛП «Ялівщина», їх видова різноманітність та еколого-ценотичні особливості. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету*. Серія «Біологія». 2024. Т. 84. № 1. С. 18–25. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.24.1.3>.

Фіторізноманіття Українського Полісся та його охорона / Т.А. Андрієнко та ін. Київ : Фітосоціоцентр, 2006. 316 с.

Цьось О.О., Музиченко О.С., Боярин М.В. Структурний аналіз вищих водних та прибережно-водних рослин річки Вижівка. Людина та довкілля. Проблеми неоекології. 2018. № 30. С. 104–111. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2018-30-08>.

Чорна Г.А. Рослини наших водойм : атлас-довідник. Київ : Фітосоціоцентр, 2001. 134 с.

Чорна Г.А. Флора водойм і боліт Лісостепу України. Судинні рослини. Київ : Фітосоціоцентр, 2006. 210 с.

Яковенко О.І. Вища водяна рослинність лісових «островів» Чернігівського Полісся. Вісник Львівського університету. Серія «Біологічна». 2022. Вип. 87. С. 23–31. <http://dx.doi.org/10.30970/vlubs.2022.87.02>.

Mosyakin S.L., Fedoronchuk M.M. Vascular Plants of Ukraine. A Nomenclatural Checklist. Kyiv : M.G. Kholodny Institute of Botany, 1999. 345 p.

Plants of the World Online. Kew Science. *Plants of the World Online* [Електронний ресурс]. URL: <http://www.plantsoftheworldonline.org> (дата звернення: 22.04.2025).

References

Andriienko, T.L., Onyshchenko, V.A., Priadko, O.I., Panchenko, S.M., Arap, R.Y., Konishchuk, V.V., Lukash, O.V., Karpenko, Y.O., Virchenko, V.M., & Chornus, O.P. (2006). Fitoriznomanittia Ukrainskoho Polissia ta yoho okhorona [Flora diversity of the Ukrainian Polissia and its protection]. Kyiv : Fitosotsiotsentr [in Ukrainian].

Dubyna, D.V. (2006). Vyshcha vodna roslynnist [Higher aquatic vegetation]. Kyiv [in Ukrainian].

Ivus, T.I. (2020). Systymatychna, ekobiomorfologichna struktura ta sozologichna tsinnist' flory vodnykh i prykhorezno-vodnykh ekosystem riky Zolotyńka (Chernihivska oblast) [Systematic, eco-biomorphological structure and cosological value of the flora of aquatic and riparian ecosystems of the Zolotyńka River (Chernihiv region)]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatyuka* [Scientific notes of the Volodymyr Hnatyuk Ternopil National Pedagogical University], 1–2 (79), 12–17. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.20.1-2.2> [in Ukrainian].

Klymenko, O.M. (2020). Vysha vodna roslynnist yak indyktor ekolohichnoho stanu hidroekosystemy (na prykladi riky Vyzhivka) [Higher aquatic vegetation as an indicator of the ecological state of the hydroecosystem (on the example of the Vyzhivka River)]. *Visnyk NUVHP. Silskohospodarski nauky* [Bulletin of the Ukrainian Agricultural University. Agricultural Sciences], 2 (90), 72–82 [in Ukrainian].

Lukash, O.V., & Andriienko, T.L. (2014). Botanichno tsinni roslynni uhrupovannia Polissia [Botanically valuable plant communities of Polissia]. Chernihiv: Desna Polyhrat [in Ukrainian].

Mekhed, O.B., & Karpenko, Yu.O. (2024). Pryberezno-vodna roslynnist zaplavy riky Sniv yak komponent rekreatsiino-reabilitatsiinoho seredovyshcha [Riparian vegetation of the Snov River floodplain as a component of the recreational-rehabilitation environment]. *Visnyk Cherkaskoho universytetu. Serii: "Biolohichni nauky"* [Bulletin of Cherkasy University. Biological Sciences Series], 1, 112–120. <https://doi.org/10.31651/2076-5835-2018-1-2024-1-112-120> [in Ukrainian].

Mekhed, O.B., & Kyriienko, S.V. (2023). Vodni ta prykhorezno-vodni fitotsenozy hydrologichnoi merezhi pivnichnykh rehioniv Chernihivshchyny [Aquatic and riparian phytocenoses of the hydrological network of the northern regions of Chernihiv region]. *Naukovyi visnyk Uzhhorods'koho universytetu. Serii: Biolohiia* [Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series "Biology"], 54, 99–103. <https://doi.org/10.32782/1998-6475.2023.54.99-103> [in Ukrainian].

Mysiienko, M.M. (2005). Metody doslidzhen vyshchykh vodnykh roslyn: navchalnyi posibnyk [Methods of research of higher aquatic plants: a manual]. Kyiv : Kyivskyi VPTS Universytet [in Ukrainian].

Optasiuk, O.M., & Liubinska, L.H. (2017). Analiz systematychnoyi struktury flory vodnykh ta bolotnykh ekosystem Podillia [Analysis of the systematic structure of the flora of aquatic and wetland ecosystems of Podillia]. *Naukovyi visnyk Chernihivskoho universytetu. Biolohiia (Biolohichni systemy)* [Scientific Bulletin of Chernivtsi University. Biology (Biological Systems)], 1 (9), 123–128 [in Ukrainian].

Sverdlov, V.O. (2024). Vodni, prykhorezno-vodni ta zaplavni biotopy terytorii RLP "Yalivshchyna", yikh vydova riznomanitnist' ta ekolohichno-tsenotychni osoblyvosti [Aquatic, riparian, and floodplain biotopes of the "Yalivshchyna" Regional Landscape Park, their species diversity and ecolog-

ical-phenotypic features]. *Naukovi zapysky Ternopil's'koho natsional'noho pedahohichnoho universytetu. Ser. "Biologhiia"* [Scientific notes of Ternopil National Pedagogical University. Series "Biology"], 84 (1), 18–25. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.24.1.3> [in Ukrainian].

Tsos, O.O., Muzychenko, O.S., & Boyaryn, M.V. (2018). Strukturnyi analiz vyshchych vodnykh ta pryberezhno-vodnykh rosllyn richky Vyzhivka [Structural analysis of higher aquatic and coastal-aquatic plants of the Vyzhivka River]. *Liudyna ta dovkillia. Problemy neoekologii* [Man and the environment. Problems of neoecology], 30, 104–111. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2018-30-08> [in Ukrainian].

Chorna, H.A. (2006). Flora vodoim i bolit Lisosteppu Ukrayiny. Sudynni roslyny [Flora of water bodies and wetlands in the Forest-steppe of Ukraine. Vascular plants]. Kyiv : Fitosotsiotsentr [in Ukrainian].

Chorna, H.A. (2001). Roslyny nashykh vodoim (atlas-dovidnyk) [Plants of our reservoirs (atlas-reference book)]. Kyiv : Fitosotsiotsentr [in Ukrainian].

Yakovenko, O.I. (2022). Vysha vodyana roslynnist' lisovykh "ostroviv" Chernihivskoho Polissia [Higher aquatic vegetation of forest "islands" of Chernihiv Polissia]. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Seriya biologichna* [Bulletin of Lviv University. Biological Series], 87, 23–31. <http://dx.doi.org/10.30970/vlubs.2022.87.02> [in Ukrainian].

Mosyakin, S.L., & Fedoronchuk, M.M. (1999). Vascular Plants of Ukraine. A Nomenclatural Checklist. Kyiv : M.G. Kholodny Institute of Botany, p. 345 [in English].

Plants of the World Online Kew Science [Plants of the World Online]. [Electronic resource] URL: <http://www.plantsoftheworldonline.org> (access date 22.04.2025) [in English].

Отримано: 25.04.2025

Прийнято: 15.05.2025



Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 12
Український журнал природничих наук
№ 12

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

УДК 636.084:636.934.5
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.6>

БІОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ, ПОТРЕБА В ПОЖИВНИХ РЕЧОВИНАХ ТА ТЕХНІКА ГОДІВЛІ НОРКА

**В. Ю. Мамченко¹, О. В. Павлюченко², О. В. Іщук³, І. І. Ковальчук⁴,
М. М. Світельський⁵, М. В. Слюсар⁶**

У статті висвітлено біологічні особливості, особливості утримання, техніку годівлі та кормовий раціон норки американської (Neogale vison). Зазначено, що для фауни України американська норка є інвазивним видом, який поширився з фермерських господарств, де вона вирощується для вироб-

¹ кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри зоології, біологічного моніторингу та охорони природи
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: 79mamchenko@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7208-6363

² кандидат біологічних наук, доцент,
завідувач кафедри зоології, біологічного моніторингу та охорони природи
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: pavluchenkolessia@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2783-1037

³ кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: ischuk_o@ukr.net
ORCID: 0000-0002-8993-8366

⁴ кандидат ветеринарних наук,
доцент кафедри зоології, біологічного моніторингу та охорони природи
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: kovalchuk_ira0982@ukr.net
ORCID: 0000-0002-2421-7533

⁵ кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри ботаніки, біоресурсів та збереження біорізноманіття
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: svitmm71@ukr.net
ORCID: 0000-0003-1501-4168

⁶ кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри зоології, біологічного моніторингу та охорони природи
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: Slusar_nv@ukr.net
ORCID: 0000-0003-1501-4168

ництва хутра. На сьогодні норка є популярним об'єктом для звірівництва не тільки в Україні, а й за її межами. Розрізняють близько 300 забарвлень, з яких для виробництва хутра використовують 30.

Норка – енергійний і спритний звір із блискавичною реакцією та поведінкою, властивою хижакам. Цих звірів не можна брати до рук без спеціальних запобіжних заходів.

Зазначено, що в разі розведення норок у господарствах норки досить вибагливі до умов утримання та годівлі. За існуючої технології м'ясоїдних хутрових звірів годують вологими мішанками із сирих, варених та сухих кормів. Наголошено на важливості дотримання встановленого режиму годівлі. Молодняк і дорослих звірів зазвичай годують двічі на добу (вранці та ввечері). На одноразове годування норок краще переводити з вересня (після поділу поголів'я на племінних і забійних звірів). Залишки корму-мішанки потрібно прибирати перед наступною роздачею, а в цуценят у підсосний період і в перші дні після відсадження – через 2–3 години після роздачі. Напувають звірів 2–3 рази на добу за допомогою шланга, взимку у сильні морози замість води в напувалку кладуть чистий сніг.

Для забезпечення норок всіма поживними речовинами, а також для отримання хутра високої якості раціони годівлі мають бути збалансованими за протеїном, амінокислотами, вуглеводами, жирами, мінеральними речовинами, вітамінами та спеціальними добавками. Наведено оптимальне співвідношення цих складових. Для складання раціонів з м'ясних продуктів найчастіше використовують кінське та бараняче м'ясо, за їх відсутності – свинину, яловичину та м'ясо птиці. Обов'язковою умовою годівлі норок є наявність рибних продуктів (морських) до 30%, субпродуктів (печінка, вим'я, рубець, сичуг, шлунок, легені, селезінка). З молочних продуктів найчастіше використовують збиране, незбиране молоко, сир. Важливо використовувати різноманітні добавки для балансування раціонів (кісткове, м'ясо-кісткове, рибне борошно).

Ключові слова: норка американська (*Neogale vison*), біологічні особливості, утримання, раціон, годівля.

BIOLOGICAL FEATURES, NUTRIENT NEEDS AND FEEDING TECHNIQUES OF MINKS

**V. Yu. Mamchenko, O. V. Pavlyuchenko, O. V. Ishchuk, I. I. Kovalchuk,
M. M. Svitelsky, M. V. Slyusar**

The article highlights the biological features, characteristics of keeping, feeding techniques and feed ration of the American mink (*Neogale vison*). It is noted that for the fauna of Ukraine, the American mink is an invasive species that has spread from farms where it is grown for fur production. Today, the mink is a popular object for animal husbandry not only in Ukraine but also abroad. There are about 300 colors, of which 30 are used for fur production.

The mink is an energetic and agile animal with a lightning-fast reaction and behavior typical of predators. These animals cannot be handled without special precautions.

It is noted that when breeding minks in farm conditions, they are quite picky about the conditions of keeping and feeding. Under the existing technology, carnivorous fur animals are fed with wet mixtures of raw, boiled and dry feed. The importance of adhering to the established feeding regimen is emphasized. Young animals and adults are usually fed twice a day (morning and evening). It is better to transfer minks to a single feeding from September (after dividing the population into breeding and slaughter animals). The remains of the mixed feed must be removed before the next distribution, and for puppies during the suckling period and in the first days after weaning – 2–3 hours after distribution. The animals are watered 2–3 times a day using a hose, in winter, in severe frosts, instead of water, clean snow is put in the drinker.

To provide minks with all the nutrients, as well as to obtain high-quality fur, feeding rations should be balanced in terms of protein, amino acids, carbohydrates, fats, minerals, vitamins and special additives.

The optimal ratio of these components is given. When compiling rations from meat products, horse and lamb are most often used, and in their absence – pork, beef and poultry. A mandatory condition for feeding minks is the presence of fish products (seafood) up to 30%, offal (liver, udder, tripe, abomasum, stomach, lungs, spleen). Of dairy products, skimmed, whole milk, cheese are most often used. It is important to use various additives to balance rations (bone, meat-bone, fish meal).

Key words: American mink (*Neogale vison*), biological characteristics, maintenance, diet, feeding.

Вступ

Американська норка (візон річковий) – *Neogale vison* – хижак із родини куницевих. Один із найцінніших промислових звірів, об'єкт кліткового розведення. Від європейської норки – *Mustela lutreola* Linnaeus, 1758 – цей вид відрізняється фенотипово та генотипово. Тварини мають різний набір хромосом, унаслідок чого їх схрещування в природі не відбувається.

Тіло американської норки струнке з короткими лапами. Довжина тіла може досягати 50 см, хвіст – 25 см. Вага самців до 2,3 кг, самок – до 1,2 кг. Плавальна перетинка погано розвинена. Хутро блискуче, м'яке. Забарвлення темно-коричнєве до майже чорного, біла пляма на нижній губі (Бала, 2009).

Американська норка була завезена на євразійський континент із Північної Америки, швидко поширилася по лісовій та лісостеповій зонах. Ареал її проживання тягнеться від середньої смуги Європи до Анадіру. *N. vison* розповсюджений по всій Європі й сьогодні активно продовжує свою експансію в різні країни (Põdra & Gómez et al., 2018; Galanaki & Kominos, 2022; Vada, 2023).

За формою тіла й зовнішністю американська норка дуже схожа на європейську. У неї довге струнке тіло з короткими лапами. Очі маленькі, вуха короткі. Хвіст довгий, становить близько 30% повної довжини тіла. Череп значно масивніший, ніж у європейського виду.

Американська норка – прекрасний плавець, вона відмінно пірнає. Нір не рие, користується готовими чужими укриттями і живе в них непостійно. При цьому помешкань зазвичай буває кілька, іноді до восьми. На дерева не лазить, лише в період розмноження деякі особини влаштовують у дуплах виводкові гнізда. Селиться уздовж річок, озер і боліт. Мисливські ділянки розташовуються вздовж берегової лінії. Узимку часто пересувається по пустотах, що утворюються між льодом і водою, яка відійшла від берега (Бусенко і Столюк, 2001).

У природі ворогами американської норки стають лисиці, рисі, дикі собаки, койоти, ведмеді, хижі птахи та річкові видри.

Період розмноження у звірків навесні. Гін – із лютого по квітень, дитинчата народжуються в травні. Особливість вагітності у цих тварин – різна тривалість: від 34 до 80 днів. Це пов'язано з наявністю латентного періоду, який змінюється за термінами.

У виводку зазвичай 5–6 цуценят, але відомі випадки народження 10 і навіть 16 дитинчат. Статевої зрілості самки досягають до року, самці – до півтора.

Тривалість життя норки – до 10 років. Це полігамна тварина: протягом сезону розмноження самець може спаровуватися з декількома самками. Самка також може спаровуватися з декількома самцями. Вага новонароджених становить близько 6 г. До 5–6 тижнів цуценята обростають червоно-коричневою шерстю. Очі відкриваються до 37-го дня, а лактація триває до 8–9 тижнів. У цьому віці молоді норки важать близько 350 г. До кінця літа молодь стає повністю самостійною і залишає матір.

Американська норка має відносно стабільну чисельність і широкий ареал проживання. Через скоєні норкою набіги на птахоферми в деяких регіонах вважається шкідливою твариною і підлягає знищенню (Бала, 2009).

В Україні виявили присутність американської норки (візона річкового) в природі ще 1950-ті роки внаслідок експансії зі звіроферм, де його розводили як цінного хутряного звіра. Уже в 60–70-х роках минулого століття цей вид вже утворив природні популяції в різних регіонах України та невдовзі став інвазивним. Вітчизняні теріологи І. Загороднюк та Д. Лазарев (Zagorodniuk & Lazarev, 2024) зазначають, що найбільш чисельні популяції американської норки в природі зустрічаються в областях, де займаються розвитком звірівництва та які є центрами інтродукції виду. Це насамперед центральні та північні регіони (Київська, Житомирська, Чернігівська області), а також сусідні західні області, пов'язані з ними річковими басейнами (Рівненська, Хмельницька, Волинська). Крім того, значна кількість знахідок описано для Донецької, Луганської, Харківської областей в басейні Сіверського Дінця (Lazarev, 2023).

Цей хижак уже встиг адаптуватися до місцевих водойм. Американська норка – відмінний плавець і мисливець. Вона мешкає біля річок, озер і боліт, харчується рибою, земноводними, гризунами та ракоподібними. Однак через свою агресивність та всеїдність цей вид завдає шкоди місцевим екосистемам, витісняючи рідкісні види, зокрема європейську норку (Medina-Vogel et al., 2015; Vada, 2023). Темпи поширення цього виду в Україні зростають, особливо в північних, центральних і східних регіонах, про що свідчать публікації в базах

даних GBIF та дані статистики полювання (Zagorodniuk & Lazariev, 2024). Саме тому знання біології цього виду є важливими як для регулювання чисельності місцевої теріофауни, так і для успішного розведення норок у неволі.

Американська норка облаштовує свої лігва під каменями або корінням дерев, часто використовує нори бобрів або ондатр, які можуть досягати до трьох метрів у довжину та одного метра вглиб. Такі нори мають кілька входів, що розташовані трохи вище за рівень води (Vada, 2023).

У випадку небезпеки цей хижак здатен випускати неприємний мускусний запах з анальних залоз, що викликає нудоту в багатьох хижаків, зокрема у лисиць і рисей.

Тісне та нестимулююче утримання норок у клітках на хутрових фермах із розведення норок призводить до розвитку стереотипів, самокалічення й агресії. Ця аномальна поведінка свідчить про поганий добробут та умови утримання. Норки відчують справжні страждання, утримуючись у таких умовах (Ібатулін та ін., 2007).

Молодняк норки швидко набирає вагу. Уперше маса їх тіла подвоюється на 6–7-й день після народження, вдруге – на 12–13-й день. До 20-го дня життя вага цуценят досягає 85–120 г. Прорізування зубів починається у віці 15–18 днів: спочатку з'являються нижні ікла або центральні різці, за ними – інші різці, а потім у такій самій послідовності – зуби верхньої щелепи. Починаючи з 30-го дня, молочні зуби поступово замінюються постійними. Цікаво, що в норки ікла змінюються таким чином: молочні випадають лише після майже повного формування постійних. Корінні зуби починають прорізуватися на 40–45-й день, а повний комплект зубів формується до 65–75-го дня життя.

У новонароджених щенят норки слуховий прохід закритий шкірними складками, які утворюються біля основи вушної раковини. Протягом першого місяця життя ці складки збільшуються й поступово розходяться, і до 29–30-го дня слуховий канал повністю відкривається. Очі в норки відкриваються значно пізніше, ніж у інших представників родини собачих, – лише на 30–31-й день життя.

У перші дні після народження цуценята не мають здатності самостійно регулювати температуру тіла. Перші ознаки терморегуляції з'являються на другому тижні, а до першого місяця життя хімічна термо-

регуляція вже досить чітко виражена. Проте значні коливання температури довкілля все ще можуть впливати на температуру їхнього тіла.

У новонароджених норки волосяний покрив починає з'являтися ледь помітно, проте вже до 6–8-го дня життя він майже повністю вкриває їхнє тіло. Без шерсті залишаються лише ділянки промежини та внутрішня поверхня стегон. Первинне волосся активно росте до віку 20–25 днів. У молодих норки віком 2,5–3 місяці наприкінці липня – на початку серпня завершується формування літнього волосяного покриву. Після цього починається формування зимової шерсті – спочатку з'являється остьове, а згодом і пухове волосся. У вересні літнє хутро поступово починає випадати, паралельно з ростом зимового покриву (Ібатулін та ін., 2007).

Метою дослідження було з'ясувати біологічні особливості, способи годівлі й умови утримання американської норки на волі і на фермах.

Матеріал і методи

У роботі використано методи аналізу та синтезу інформації, інтерпретації отриманих даних, узагальнення, спостереження. Об'єкт дослідження: американська норка (візон річковий) – *Neogale vison* – хижак із родини куніцевих.

Результати та їх обговорення

Період підготовки до розмноження у норки триває досить довго: у самок – від моменту відсадження цуценят у червні до початку гону, а в самців – із завершення попереднього гону в квітні до наступного, який починається на початку березня. Після відлучення цуценят більшість самок виснажені, тому в червні та протягом липня й серпня вони потребують якісного годування та догляду. У цей період доцільно годувати дорослих самок за раціонами, призначеними для племінного молодняка.

Із серпня в основного стада починає активно зростати вгодованість. До листопада маса тіла дорослих норки збільшується на 20–30% порівняно з червнем – завдяки накопиченню жиру та білкових запасів, що є важливою умовою для їхньої повноцінної репродуктивної функції. У літньо-осінній період дорослі самки споживають у середньому 250 ккал на добу, з варіаціями від 220 до 280 ккал залежно від розміру тварини. На кожні 100 ккал корму має припадати: 10–11 г перетравного білка, 3–4 г жиру, 4,2–5 г вуглеводів.

У зимовий період добре зарекомендував себе такий склад раціону на 100 ккал обмінної енергії: м'язове м'ясо та печінка – 4–6 г, кормова риба – 20–30 г, м'які субпродукти – 10–15 г, кісткові субпродукти – 8–12 г, сир – 4,5 г. Додатково дозволено включення 1–2 г рибного борошна та якісних кормових дріжджів. Усі компоненти повинні бути бездоганної якості.

Восени та взимку норок зазвичай годують один раз на день, а в сильні морози – двічі. Самці потребують калорійнішого раціону – на 25–35 % більше, ніж самки, через більші розміри й активність у період гону. Крім того, їм необхідно більше білка для виробництва сперми, тому самцям дають більше корму та в разі потреби запроваджують додаткове підживлення – до 50 г на голову (суміш із м'яса, печінки, сиру, молока тощо) (Жинчин, 2004).

Молодих норок зазвичай відсаджують від матері у віці 35–40 днів, а якщо самка ослаблена – уже у 30 днів. Щоб зменшити стрес у самок, рекомендується не забирати одразу весь виводок, а залишити з матір'ю 2–3 найменших щенят ще на 3–7 днів. Протягом перших 10–15 днів після відсадження молодняк отримує той самий раціон, що й під час перебування із самкою. Їжу розміщують на спеціальних дощечках. Із віку 2–2,5 місяця корм роблять густішим і розкладають його на сітчасту стелю клітки.

Основою харчування молодняку є раціони з пониженим вмістом перетравного білка (8–8,5 г на 100 ккал), але з підвищеним вмістом жирів або вуглеводів. За умови використання повноцінних кормів і програм для оптимізації раціону рівень білка може знижуватися до 6–7 г на 100 ккал. Наприкінці лактаційного періоду для забезпечення інтенсивного росту щенят поступово підвищують вміст жиру, досягаючи на початку липня 5–5,5 г на 100 ккал за мінімальної кількості перетравних вуглеводів 3–3,5 г на порцію.

Вимоги до кормів для норок. Сучасна технологія годівлі м'ясоїдних хутрових звірів передбачає використання вологих мішанок, що складаються із сирих, варених і сухих кормів. Така кормосуміш повинна відповідати низці важливих вимог:

Структура та подрібнення корму. Інгредієнти мають бути добре подрібнені й легко змішуватися. Компоненти повинні рівномірно розподілятися, щоб тварини не вибирали тільки улюблені частини, залишаючи менш привабливі (кістки, зелень,

кашу). Допустимі розміри частинок: для м'ясо-рибних компонентів – до 5 мм, овочів – 1–1,5 мм, зернових і сухих кормів – до 0,8 мм.

Однорідність. Готова суміш має бути рівномірною за складом, містити всі інгредієнти в тих пропорціях, які передбачені раціоном.

Консистенція та в'язкість. Залежно від пори року та віку тварин корм повинен мати відповідну густину. Він не має розсипатися під час роздачі чи поїдання, але й не бути надто липким, що утруднює споживання й ускладнює роботу техніки. Узимку корм роблять густішим, особливо в морози, а також у разі роздачі на сітку. Більш рідку консистенцію використовують для годівлі самок у період лактації і маленьких щенят.

Якість і безпечність. Усі інгредієнти повинні проходити ветеринарно-санітарну перевірку. Нові види кормів вводяться поступово – від 1 до 5 г на 100 ккал корму.

Температура й умови зберігання. У літній період корм повинен мати температуру близько +6–12 °С, а взимку – приблизно +25 °С. Перемішування інгредієнтів триває не довше ніж 15–20 хвилин після внесення останнього компоненту. Готову суміш одразу доставляють на ферму. Без консервантів її дозволяється зберігати не більше години з моменту приготування. Під час приготування й транспортування важливо запобігати потраплянню пилу, стічних вод, гризунів, комах тощо (Недава, 1979).

Техніка годівлі норок. Готову кормосуміш доставляють на ферму в герметично закритому транспорті – це можуть бути кормові агрегати або автомобілі з ізотермічними кузовами. Після транспортування суміш вивантажують у спеціальні візки з мірною шкалою, шеди або бункери мобільних кормороздачів. Навесні годування основного стада зазвичай здійснюють вручну, розкладаючи корм на внутрішні дерев'яні полиці, прикріплені до дверцят кліток. Щенят, які ще перебувають під матір'ю, спочатку годують у будиночках, а потім – на вигулах біля входу до гнізда, використовуючи плоскі годівниці. З двомісячного віку й до моменту забою корм молодняка кладуть на сітчасту стелю клітки.

Важливо суворо дотримуватися встановленого режиму годівлі. Як молодняк, так і дорослі тварини зазвичай отримують корм двічі на добу – вранці та ввечері. Перехід на одноразову годівлю рекомендується проводити з вересня, після розподілу тварин на

племінну й забійну групу (Бурлака та ін., 2004).

Перед черговим годуванням залишки корму потрібно обов'язково видалити. У період вигодовування щенят та в перші дні після відсадження це слід робити через 2–3 години після роздачі їжі. Годування здійснюється 2–3 рази на добу за допомогою шланга. У морозну погоду замість води тваринам дають чистий сніг. У деяких країнах активно розробляють методи годівлі м'ясоїдних звірів сухими повнораціонними гранульованими комбікормами. Проте в Україні широке впровадження цього підходу стримується нестачею якісного рибного борошна, яке є основним компонентом гранул, його високою вартістю, а також складнощами із водозабезпеченням у холодну пору року в разі утримання тварин у відкритих шедрах (Степаняк, 1999).

Потреба норок у поживних речовинах, вітамінах, мікроелементах

Протеїн. Потреба дорослих норок упродовж листопада – квітня – 10–11 г, а липня – жовтня – 8–9 г. У період лактації протеїн рекомендовано знизити до 8,5–9,5 г через збільшення кормової суміші. Потреба молодняка норок у протеїні перебуває в межах 8–9 г на 100 ккал ОЕ (Gabrielle B. Clark et al., 2025).

Жири. Жири є концентрованішим і порівняно з білком дешевшим джерелом енергії. У розрахунку на 100 ккал ОЕ рекомендовано такі норми жиру для норок: упродовж грудня – квітня – 3,2–4,2 г, травня – червня – 4,0–4,8, а з липня по 15 вересня – 4,3–5,5, при цьому від 16 вересня до листопада – 3,5–4 г. Додавання жиру до раціону норок у літній період позитивно впливає на їхній ріст та якість хутра. Проте приблизно за 1,5–2 місяці до забою молодняка доцільно зменшити вміст жиру до 3–4 г на 100 ккал обмінної енергії (ОЕ), водночас збільшуючи частку вуглеводів до 5 г на 100 ккал ОЕ, щоб уникнути дефектів волосного покриву. У зимовий період кількість жиру в раціоні також скорочують, зокрема у самок, щоб запобігти ожирінню.

Вуглеводи. Оптимальною вважається частка вуглеводів у межах 15–30% від загальної калорійності раціону. Для молодняка влітку доцільно забезпечувати 17–22% вуглеводів від ОЕ, а восени – 22–30% (Rørbæk et al., 2023).

Мінеральні речовини. Ідеальне співвідношення кальцію і фосфору має бути в межах 1 : 1 – 1,7 : 1. Це забезпечується за умови

введення в раціон 5–7 г або більше свіжо-подрібненої кістки на кожні 100 ккал ОЕ. Для поповнення запасів натрію в організмі рекомендується додавати кухонну сіль – по 0,2–0,3 г на 100 ккал ОЕ.

Риба в раціоні. Оскільки риба становить значну частину харчування м'ясоїдних хутрових звірів, важливо враховувати її вплив. Надмірне використання минтаю, путасу й інших риб із родини тріскових (понад 25–30% раціону) або продуктів їх переробки може викликати залізодефіцитну анемію, особливо в норок. Це зумовлено наявністю триметиламіноксиду (ТМАО або ТРІОКС), який переводить засвоюване двовалентне залізо в його тривалентну, незасвоювану форму, внаслідок чого у тварин виникає брак заліза, необхідного для синтезу гемоглобіну (Rørbæk et al., 2023). До раціонів хижих хутрових звірів традиційно включено досить багато риби. Додавання до раціону помітної частки минтаю (понад 25–30%), а також путасу, інших риб із родини тріскових та відходів їх переробки часто призводить до розвитку у звірів, особливо в норок, залізодефіцитної анемії. Пов'язано це з наявністю в тілі цих риб специфічної речовини триметиламіноксиду (ТМАО або ТРІОКС), яка переводить залізо, що знаходиться у кормах, у незасвоювану форму (із двовалентного в тривалентний). Так організм тварин перестає отримувати ферум, необхідний для синтезу гемоглобіну (Rørbæk et al., 2023).

Вітаміни є важливим компонентом у раціоні норок. Вітамін А (ретинол). Норма – 500 МО на 1 кг живої маси. Вітамін D (кальциферол) тварини отримують із м'яких субпродуктів, кормових дріжджів та зернової каші, які є найбагатшими джерелами вітаміну D. Вітамін Е (α-токоферол) достатньо давати звірам у дозі 2 мг/100 ккал ОЕ.

Вітамін B1 (тіамін) у значних кількостях міститься в морській рибі. У зв'язку зі зменшенням обсягів постачання минтаю та збільшенням кількості звірів вітчизняні фермери активно шукають нові джерела рибного корму. Перспективними є такі види: мойва, оселедці, кілька, сардина, сардинела, хамса, салака, тюлька, а також окремі прісноводні риби, зокрема короп, корюшка, карась, налим, окунь і судак. Щоб запобігти розвитку авітамінозу B1 у разі годування сирією рибою, у ті дні, коли її не дають, раціон рекомендується додатково збагачувати тіаміном – до 2 мг на одну норку на добу (Rørbæk et al., 2023).

Вітамін В2 (рибофлавін). Дефіцит рибофлавіну може виникати у тварин за зниженого рівня білка в кормі (менше ніж 7 г на 100 ккал ОЕ) і надмірного вмісту жиру в раціоні.

Вітамін РР (нікотинова кислота). Для норок добова потреба в цьому вітаміні становить приблизно 0,5 мг на кожні 100 ккал ОЕ.

Пантотенова кислота. Її нестача спостерігається, коли в раціоні переважають сухі тваринні корми та варені м'ясо-рибні продукти без додавання дріжджів. Нормальна добова потреба норок у цьому вітаміні – 3 мг на одну голову (Проваторов і Проваторова, 2004).

Вітамін В6 (піридоксин) необхідний норкам у кількості 1 мг на одну тварину на добу.

Вітамін В9 (фолієва кислота) використовується у випадках захворювань або порушень функцій печінки. У таких ситуаціях рекомендується додавати до раціону фолієву кислоту в дозі 0,2 мг на голову щодня до повного одужання. Найкращого ефекту досягають у разі поєднання з вітаміном В12.

Ціанкобаламін (вітамін В12) потрібен норкам у дозі 5 мкг на кожен кілограм живої маси щодня.

Вітамін С (аскорбінова кислота) завдяки своїм антиоксидантним властивостям допомагає уникнути наслідків дефіциту вітамінів А, Е, В1, В2, В12 та пантотенової кислоти. Рекомендована добова доза для норок – 20 мг на голову (Бурлака та ін., 2004).

Висновки

Норка американська на сьогодні є досить популярним об'єктом звірівництва. За умови правильної годівлі й утримання цих тварин у фермерських та індивідуальних господарствах можна отримати досить високий рівень прибутку. Однак потрібно дотримуватися відповідного режиму та техніки годівлі, забезпечення тварин всіма поживними речовинами, кормами тваринного походження, молочними продуктами і різноманітними добавками, що необхідні для отримання життєздатних нащадків і високоякісного хутра.

Перспективи подальших досліджень полягають в аналізі та розробці оптимальних раціонів у різні статеві періоди вирощування норки американської в умовах звіроферми.

Список використаної літератури

- Бала В.І. Технологія виробництва продукції кролівництва і звірівництва : підручник. Вінниця : Нова Книга, 2009. С. 192–259.
- Бурлака В.А., Кривий М.М., Шевчук В.Ф. Годівля сільськогосподарських тварин : навч. посібник. Житомир : Вид-во «Держ. агрокол. ун-т», 2004. С. 369–386.
- Бусенко О.Т., Столюк В.Д. Технологія виробництва продукції тваринництва. Київ : Аграрна освіта, 2001. С. 341–356.
- Жинчин М.Я. Економічна ефективність хутового звірівництва – основа конкурентоспроможності галузі. *Вісник ПДАТА*. 2014. № 12. Т. 2. С. 114–117.
- Ібатулін І.І., Мельничук Д.О., Богданов Г.О. Годівля сільськогосподарських тварин : підручник. Вінниця : Нова Книга, 2007. С. 423–434.
- Мирось В.В. Довідник звіророда. Київ : Урожай, 1992. С. 125–128.
- Недава В.Ю. Звірівництво. Київ : Урожай, 1979. С. 156–160.
- Проваторов Г.В., Проваторова В.О. Годівля сільськогосподарських тварин. Суми : Університетська книга, 2004. С. 345–423.
- Степаняк І.В. Хутові звірі. Київ, 1999. С. 72–78.
- Galanaki A., Kominos T. The distribution of American mink (*Neovison vison*) in Greece. *Mammalia*. 2022. № 86. P. 57–65. <https://doi.org/10.1515/mammalia-2020-0067/html>.
- Gabrielle B. Clark, Maria Diez-Leon, Rebecca K. Meagher. Early-life enrichment in American mink (*Neogale vison*): Effects of juvenile physical enrichment on behaviour, temperament, and long-term stereotypic behavior. *Animal Welfare*. 2025. Vol. 34. № 13. e5 p. <https://doi.org/10.1017/awf.2024.71>.
- Lazariev D. Alien mammal species in floodplain habitats of the Siversky Donets basin (Ukraine). *Theriologia Ukrainica*, 2023. № 25. P. 15–33. <https://doi.org/10.53452/TU2504>.
- Medina-Vogel G., Barros M., Monsalve R. Pons D.J. Assessment of the efficiency in trapping North American mink (*Neovison vison*) for population control in Patagonia. *Rev. Chile. Historia Nat.* 2015. № 88. P. 1–12. <https://doi.org/10.1186/s40693-015-0040-8>.
- Pödra M. Gómez A. Rapid expansion of the American mink poses a serious threat to the European mink in Spain. *Mammalia*. 2018. № 82 (6). P. 580–588. <https://doi.org/10.1515/mammalia-2017-0013>.

Rørbæk R.W., Andersen T.A., Pertoldi C., Jørgensen A. Pagh S. Diet of free ranging American mink (*Neovison vison*) in Denmark. *Animals*. 2023. № 13. 461 p. <https://doi.org/10.1186/S40693-015-0040-8>.

Vada R. Feral American mink *Neogale vison* continues to expand its European range: Time to harmonise population monitoring and coordinate control. *Mamm. Rev.* 2023. № 53. P. 158–176. <https://doi.org/10.1111/mam.12315>.

Zagorodniuk I., Lazarev D. Dynamics of distribution of introduced mammals in Ukraine and factors influencing them. *Biosystems Diversity*. 2024. Vol. 32 (4). P. 522–542. <https://doi.org/10.15421/012455>.

References

Bala, V.I. (2009). Tekhnolohiia vyrobnytstva produktsii krolivnytsva i zvirivnytsva: pidruchnyk [Technology of production of rabbit and animal products: textbook]. Vinnytsia : Nova Knyha [in Ukrainian].

Burlaka, V.A., Kryvyi, M.M., & Shevchuk, V.F. (2004). Hodivlya silskohospodarskykh tvaryn: navch. posibnyk [Feeding of agricultural animals: a manual]. Zhytomyr : Publishing house “State Agroecological University” [in Ukrainian].

Busenko, O.T., & Stoliuk, V.D. (2001). Tekhnolohiia vyrobnytstva produktsii tvarynnytsva [Technology of livestock production]. Kyiv : Ahrarna osvita [in Ukrainian].

Zhynchyn, M.Ia. (2014). Ekonomichna efektyvnist khutrovoho zvirivnytsva – osnova konkurentospromozhnosti haluzi [Economic efficiency of fur farming – the basis of the industry’s competitiveness]. *Visnyk PDATA [Bulletin of the Ukrainian Academy of Agricultural Sciences]*, 12 (2), 114–117 [in Ukrainian].

Ibatullin, I.I., Melnychuk, D.O., & Bogdanov, G.O. (2007). Hodivlia silskohospodarskykh tvaryn: pidruchnyk [Feeding of agricultural animals: textbook]. Vinnytsia : Nova Knyha [in Ukrainian].

Myros, V.V. (1992). Dovidnyk zvirovoda [Handbook of animal breeders]. Kyiv : Urozhay [in Ukrainian].

Nedava, V.Yu. (1979). Zvirivnytsvo [Animal Husbandry]. Kyiv: Urozhay [in Ukrainian].

Provatorov, G.V., & Provatorova, V.O. (2004). Hodivlya silskohospodarskykh tvaryn [Feeding of agricultural animals]. Sumy : Universytetska knyha [in Ukrainian].

Stepaniak, I.V. (1999). Khutrovi zveri [Fur Animals]. Kyiv [in Ukrainian].

Galanaki, A., & Kominos, T. (2022). The distribution of American mink (*Neovison vison*) in Greece. *Mammalia*, 86, 57–65. <https://doi.org/10.1515/mammalia-2020-0067> [in English].

Gabrielle, B. Clark, Maria, Diez-Leon, & Rebecca, K. Meagher (2025). Early-life enrichment in American mink (*Neogale vison*): Effects of juvenile physical enrichment on behaviour, temperament, and long-term stereotypic behavior. *Animal Welfare*, 34, 13, e5. <https://doi.org/10.1017/awf.2024.71> [in English].

Lazarev, D. (2023). Alien mammal species in floodplain habitats of the Siversky Donets basin (Ukraine). *Theriologia Ukrainica*, 25, 15–33. <https://doi.org/10.53452/TU2504> [in English].

Medina-Vogel, G., Barros, M., Monsalve, R. & Pons, D.J. (2015). Assessment of the efficiency in trapping North American mink (*Neovison vison*) for population control in Patagonia. *Rev. Chile. Historia Nat*, 88, 1–12. <https://doi.org/10.1186/s40693-015-0040-8> [in English].

Pödra, M. & Gómez, A. (2018). Rapid expansion of the American mink poses a serious threat to the European mink in Spain. *Mammalia*, 82 (6), 580–588. <https://doi.org/10.1515/mammalia-2017-0013> [in English].

Rørbæk, R.W., Andersen, T.A., Pertoldi, C., Jørgensen, A. & Pagh, S. (2023). Diet of free ranging American mink (*Neovison vison*) in Denmark. *Animals*, 13, 461. <https://doi.org/10.1186/S40693-015-0040-8> [in English].

Vada, R. (2023). Feral American mink *Neogale vison* continues to expand its European range: Time to harmonise population monitoring and coordinate control. *Mamm. Rev*, 53, 158–176. <https://doi.org/10.1111/mam.12315> [in English].

Zagorodniuk, I., & Lazarev, D. (2024). Dynamics of distribution of introduced mammals in Ukraine and factors influencing them. *Biosystems Diversity*, 32 (4), 522–542. <https://doi.org/10.15421/012455> [in English].

Отримано: 22.04.2025
Прийнято: 15.05.2025



Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 12
Український журнал природничих наук
№ 12

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

ГЕОГРАФІЯ

УДК 504.5(477.81)

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.7>

ГЕОЕКОЛОГІЧНА СИТУАЦІЯ НА ТЕРИТОРІЇ ЖИТОМИРСЬКОЇ ОБЛАСТІ: АНАЛІЗ ДАНИХ ЗА ПЕРІОД 2019–2024 РР.

В. М. Воловик¹, Т. В. Андрійчук², О. М. Цілик³, Р. П. Власенко⁴, В. С. Костюк⁵

У цій статті проведено аналіз сучасного стану навколишнього природного середовища на території Житомирської області та визначено основні чинники, що вплинули на формування геоекологічної ситуації у регіоні впродовж 2019–2024 рр.

Досліджено, що забруднення атмосферного повітря в регіоні здебільшого спричинене певними галузями промисловості (як-от теплоенергетика, металургія, нафтохімічна та будівельна галузі), а також автотранспортом. Щодо водних ресурсів, то основними забруднювачами є скиди зворотних вод від різних виробництв і господарств. Аналіз показав, що ці скиди містять розчинені мінеральні неорганічні солі, важкі метали й органічні речовини. Протягом досліджуваного періоду в Житомирській області 12 підприємств здійснювали скиди забруднених стічних вод у поверхневі водні об'єкти. Серед найбільших забруднювачів були житлово-комунальні господарства,

¹ доктор географічних наук, професор,
професор кафедри географії
(Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського, м. Вінниця)
e-mail: wolowyk@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8663-0342

² кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: andriychuk2012@ukr.net
ORCID: 0000-0001-5402-9528

³ студент кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: tsilyk_alex@gmail.com
ORCID: 0009-0009-0235-712X

⁴ 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

⁵ 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

підприємства переробної та транспортної промисловості, а також сфери обслуговування будинків та охорони здоров'я. При цьому радіологічний стан поверхневих вод Житомирської області залишався стабільним і без істотних змін.

На підставі аналізу встановлено, що основною екологічною проблемою Житомирщини є поводження з відходами. Основну складову в загальній масі відходів області займають тверді побутові та виробничі відходи IV класу небезпеки. Одним з основних методів збереження видового різноманіття на території Житомирської області є створення природоохоронних територій. За результатами дослідження авторами запропоновано заходи оптимізації щодо підвищення геоecологічної ситуації на Житомирщині.

Ключові слова: Житомирська область, геоecологічна ситуація, викиди, забруднюючі речовини, антропогенне навантаження, природозбереження.

GEO-ECOLOGICAL SITUATION IN THE TERRITORY OF ZHYTOMYR REGION: ANALYSIS OF DATA FOR THE PERIOD 2019–2024

V. M. Volovyk, T. V. Andriichuk, O. M. Tsilyk, R. P. Vlasenko, V. S. Kostiuk

It is analysed the current state of the environment in the Zhytomyr region and identifies the main factors that influenced the formation of the geoecological situation in the region during 2019–2024 in the article.

It was determined that air pollution in the region is primarily caused by specific industrial sectors (such as thermal power engineering, metallurgy, petrochemical, and construction industries), as well as road transport. Regarding water resources, the main pollutants are discharges of wastewater from various industrial and domestic activities. Analysis revealed that these discharges contain dissolved mineral inorganic salts, heavy metals, and organic substances. During the study period, 12 enterprises in the Zhytomyr region discharged contaminated wastewater into surface water bodies. The largest polluters included housing and communal services, enterprises in the processing and transport industries, as well as building maintenance and healthcare sectors. Notably, the radiological status of surface waters in the Zhytomyr region remained stable and without significant changes.

Based on the analysis, it was established that the main environmental problem of Zhytomyr region is waste management. The main component of the total mass of waste in the region is solid household and industrial waste of hazard class IV. One of the main methods of preserving species diversity in the territory of Zhytomyr region is the creation of nature reserves. Based on the results of the study, the authors proposed ways to optimize the improvement of the geoecological situation in the territory of Zhytomyr region.

Key words: Zhytomyr region, geoecological situation, emissions, pollutants, anthropogenic load, nature conservation.

Вступ

Упродовж минулих десятиліть проблеми дослідження стану навколишнього середовища Житомирської області стають актуальнішими, що зумовлено підвищенням рівня шкідливих викидів автотранспорту в атмосферне повітря, забрудненням поверхневих і ґрунтових вод викидами та стоками промислових підприємств, виснаженням і засоленням ґрунтів, зменшенням запасів природних ресурсів, зникненням унікальних видів флори та фауни. Крім того, територія досліджуваного регіону й досі зазнає наслідків аварії на Чорнобильській АЕС (1986 р.) та повномасштабної російсько-української війни (з 2022 р. і донині) (Койнова і Стойко, 2012; Федулова, 2013; Боярин і Нетробчук, 2016; Сташенко і Костюк, 2023).

Систематичний антропогенний тиск на навколишнє середовище Житомирщини порушує баланс геокомпонентів, що, у свою чергу, негативно впливає на соціально-демографічні показники, стан здоров'я населення та загальну геоecологічну ситуацію в країні. У таких умовах важливим завданням державної екологічної політики є охорона й відновлення природних ресурсів, виявлення та заповідання природних територій і об'єктів (Круглов, 2005). Ця проблема була висвітлена в ряді наукових публікацій (Круглов, 2004; Нестерчук, 2011; Гродзинський, 2014; Гавриленко і Шищенко, 2022). Однак детальних досліджень геоecологічного стану Житомирської області було здійснено недостатньо.

Метою статті є проаналізувати сучасний стан і чинники формування геоecоло-

гічної ситуації на Житомирщині впродовж 2019–2024 рр. і запропонувати шляхи її оптимізації.

Матеріал і методи

Під час дослідження було використано загальноприйняті теоретичні методи, зокрема аналіз і синтез наукових джерел. Оцінка геоecологічного стану регіону здійснювалася з використанням статистичного, порівняльно-географічного та картографічного методів. Інформаційну базу дослідження склали офіційні матеріали Департаменту екології та природних ресурсів Житомирської обласної державної адміністрації, Головного управління статистики у Житомирській області та Державної служби статистики України (Департамент..., 2024; Головне..., 2024; Державна..., 2024).

Результати

Основними забруднювачами (Екологічний..., 2021; Регіональна..., 2022) атмосферного повітря Житомирської області впродовж минулих років є різні галузі промисловості (теплоенергетика, металургійний комплекс, нафтохімічна та будівельна промисловості) та автотранспорт. У період з 2022 по 2024 рік на якості повітря позначилося ведення бойових дій на території країни та Житомирської області зокрема, результати від яких можуть мати довготривалі наслідки (Сак та ін., 2022).

Статистичні звіти за період воєнного стану (2022–2024 роки) не були оприлюднені органами Державної статистики, тому було проаналізовано динаміку показників викидів

забруднювальних речовин в атмосферу за 2019–2021 роки. Згідно з отриманими даними, у 2021 році порівняно з 2020 роком спостерігалось збільшення обсягів викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря на 4,81 тис. т (+8,2%). Динаміку викидів забруднювальних речовин від стаціонарних і пересувних джерел наведено на рис. 1.

За звітний період від стаціонарних джерел у повітря надійшло 149,64 тис. т забруднювальних речовин, тоді як від пересувних – 36,4 тис. т. Отже, викиди від стаціонарних джерел були на 75,67% вищими, ніж від пересувних. У 2021 році Житомирська область посіла 19-ту позицію серед регіонів України за обсягами викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел (Регіональна..., 2022).

Визначальним інтегрованим індикатором стану атмосферного повітря є обсяг забруднювальних речовин, розрахований у перерахунку на одного мешканця та на 1 км² території. У 2021 році рівень викидів від стаціонарних джерел у Житомирській області на одну особу становив 49,85 кг, що на 17,18% менше порівняно з 2019 роком. У перерахунку на 1 км² площі щільність викидів у 2021 році досягла 1968,02 кг, що на 20,14% нижче за показник 2019 року (рис. 2).

Загальний обсяг викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря Житомирської області стаціонарними джерелами у період 2019–2021 рр. стано-

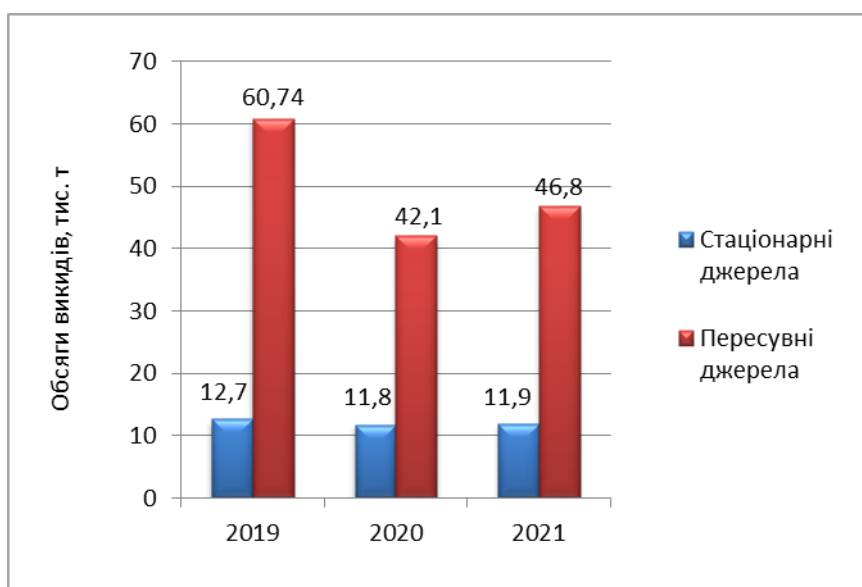


Рис. 1. Показники забруднення атмосферного повітря Житомирської області шкідливими викидами з різних джерел у 2019–2021 роках (у тис. т)

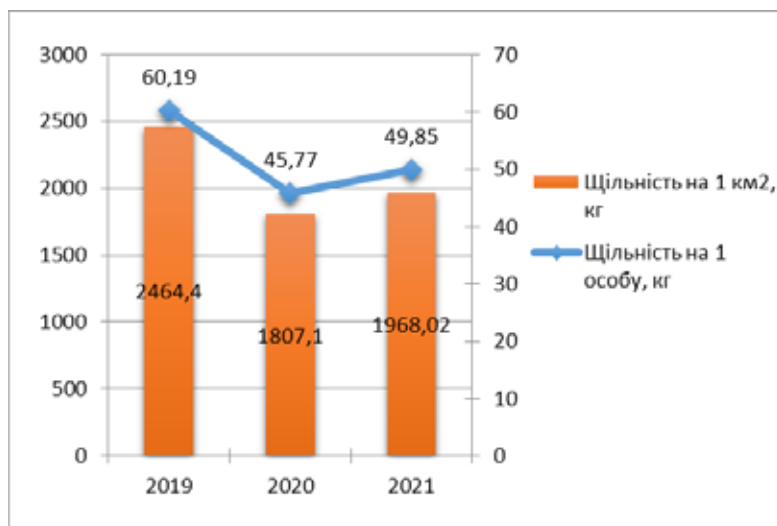


Рис. 2. Концентрація викидів забруднювальних речовин (кг) у атмосферну Житомирщини за 2019–2021 рр.

вив 36 447,2 т, з яких 10 070,8 т твердих суспендованих частинок, 6378,6 т карбон (IV) оксиду, 5946,4 т сполук нітрогену, 2589,5 т сульфур (IV) оксиду та сполук сульфуру, 1463 т неметанових летких органічних сполук і 42,1 т металів та їх сполук.

Згідно з динамікою обсягів викидів забруднювальних речовин в атмосферу області у 2021 році порівняно з показниками 2020 р. спостерігалось збільшення обсягів викидів сульфур (IV) оксиду (на 36,36%) та деяке збільшення обсягів нітроген (IV) оксиду (на 6,67%) (Цілик, 2024).

Загальне збільшення обсягів викидів забруднювальних речовин в атмосферу також призводить до зростання навантаження на одну особу й одиницю площі області.

Викиди шкідливих речовин на території області варіюються залежно від адміністративних районів. Зокрема, у 2021 році, на відміну від 2020 року, спостерігалось збільшення обсягів викидів у Бердичівському районі на 30%, тоді як у Звягельському районі вони зменшились на 15,3%. Найбільшими забруднювачами у 2021 році були суб'єкти господарювання Житомирського та Коростенського районів, які становили 35,5% та 28,7% відповідно від загального обсягу викидів у регіоні (Цілик, 2024). Розподіл викидів в атмосферне повітря від стаціонарних джерел за адміністративними районами наведено на рис. 3.

Житомирська область належить до регіонів із низьким рівнем водозабезпечення порівняно з іншими областями України. Зі

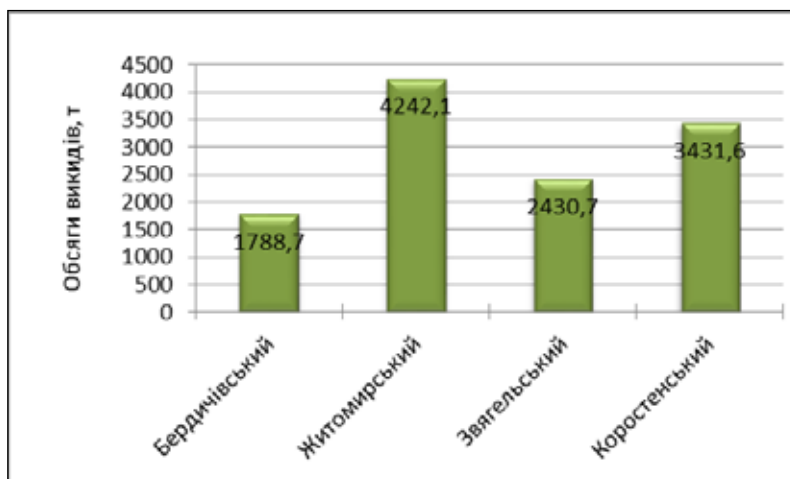


Рис. 3. Обсяги викидів (т) в атмосферне повітря по районах Житомирської області у 2021 р.

збільшенням обсягів використання водних ресурсів у Житомирській області зросли і обсяги скидання стічних вод. Зараз проблема забруднення поверхневих вод стає все більш загрозливою. Основною причиною цього є забруднення стічними водами, які надходять від корпоративної системи та муніципалітетів (Цілик, 2024).

У 2022 році в поверхневі водні об'єкти Житомирської області здійснювалося скидання стічних вод зі 154 точкових джерел. Загальний обсяг стічних вод, скинутих у поверхневі води, становив 52,61 млн м³.

Відповідно до аналізу звітів (Регіональна..., 2022), у поверхневі водні об'єкти впродовж 2022 р. було скинуто 52,608 млн м³ зворотних вод. Із загального обсягу стічних вод, що потребували очищення на очисних спорудах, 95,7% було скинуто в поверхневі води як стандартно очищені на біологічних і механічних очисних спорудах (24,426 млн м³), а 4,3% – як такі, що не відповідають стандартним вимогам доочищення (1,105 млн м³) (рис. 4).

Аналіз звітів доводить, що скиди забруднених стічних вод у поверхневі водні об'єкти Житомирської обл. протягом 2022 р. відбувалося від 12 підприємств.

Основними забруднювачами є житлово-комунальні господарства, оборонна, переробна та транспортна промисловості, а також сфери обслуговування будинків і охорони здоров'я (рис. 5). Це пояснюється тим, що каналізаційні очисні споруди комунальних підприємств застарілі й не працюють ефективно. Для забезпечення їх

безперебійної роботи потрібно здійснити реконструкцію з інтеграцією новітніх технологій очищення стічних вод.

Упродовж 2022 р. у водні об'єкти області разом зі скидами надійшло 15 513,84 т забруднювальних речовин. Домінуючими шкідливими речовинами, які потрапили разом зі скидами зворотних вод у водотоки, були: сухий залишок (розчинені у воді мінеральні неорганічні солі, Са, Mg, К, Na, важкі метали й органічні речовини) – 8914,5 т/рік; хлориди – 2912,1 т/рік; сульфати – 1189,6 т/рік; нітрати – 638 т/рік (Регіональна..., 2021; Регіональна..., 2022; Смілий та ін., 2021).

Аналіз стану водойм неможливий без урахування радіаційного фону поверхневих вод. Вимірювання вмісту Sr та Cs на території Житомирщини здійснюється щоквартально лабораторіями на річках Уж (водозабір міста Коростеня), Ірша (водозабір міста Малин), а також на річці Уборть (селище Рудня-Хочинська).

Радіологічний стан поверхневих вод Житомирської області впродовж 2023 р. стабільний без змін (рис. 6). Виявлені рівні радіонуклідів у воді були значно нижчими за відповідні нормативні значення.

Істотною екологічною проблемою Житомирської області є антропогенне забруднення поверхневих водних об'єктів твердими побутовими відходами. Це проявляється в несанкціонованому залишенні пластикових, скляних, поліетиленових і металевих відходів на прибережних територіях та безпосередньо у водоймах (Цілик, 2024).



Рис. 4. Обсяги відведених зворотних вод (млн м³) у поверхневі водні об'єкти Житомирщини

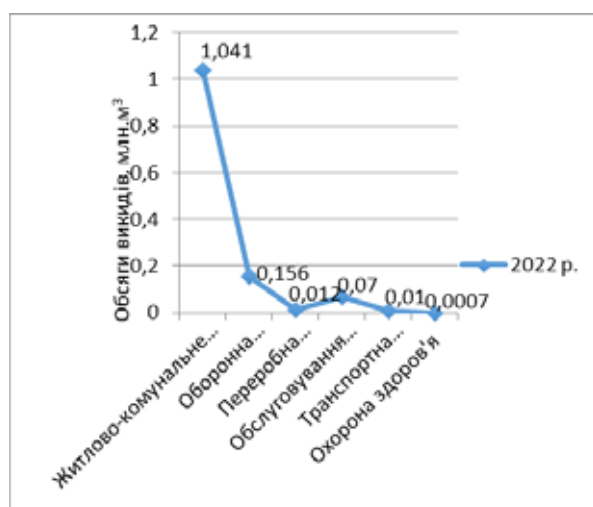


Рис. 5. Обсяги скидів забруднених стічних вод (млн м³) за секторами економіки у 2022 р.

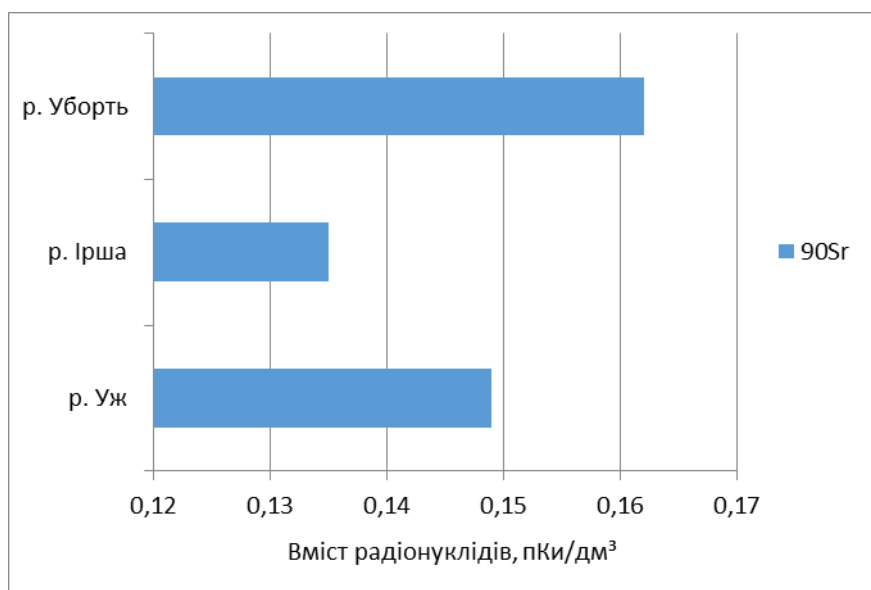


Рис. 6. Середні показники радіонукліду стронцію-90 (пКи/дм³) у водоймах Житомирщини (2023 р.)

Площа земельного фонду Житомирщини на початок 2022 року становить 2982,7 тис. га (Екологічний..., 2022). Структура земельного фонду представлена на рис. 7.

Типи земель у Житомирській області представлені: сільськогосподарськими угіддями, лісами та лісовкритими землями, чагарниковою рослинністю природного походження, землями без або з слабо розвиненим рослинним покривом, водами.

Низка природних і техногенних чинників спричиняють поширення ерозійних

процесів. Найбільша площа ерозійно нестійких (слабо, середньо- та сильнозмитих) земель спостерігається в Бердичівському та Житомирському районах.

На кінець 2022 року на території Житомирської обл. площі малопродуктивних земель, на яких спостерігаються деградаційні процеси, досягають 460 тис. га, включно із заболоченими, перезволоженими, підданими вітровій ерозії та водній ерозії (Екологічний..., 2022):

У 2022 році через вплив різноманітних природних і техногенних чинників на

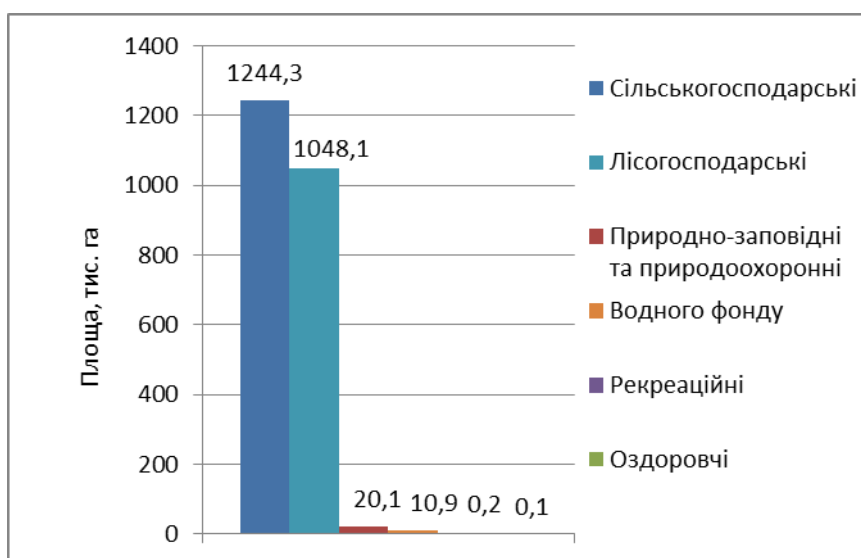


Рис. 7. Площа земельного фонду (тис. га) за категоріями земельного фонду Житомирщини

значних територіях Житомирської області спостерігалось погіршення якості ґрунтового покриву. Це зумовлено вирощуванням нерайонованих культур (соняшник, кукурудза) на ґрунтах із низькими показниками природної родючості.

Повна площа сільськогосподарських земель області, розташованих на схилах, становить понад 63 тис. га, серед яких 66% – це пологі схили, близько 30% – схили крутістю 3–5°, 14% – круті схили з ухилом поверхні понад 7°. На пологих схилах найчастіше розвивається площинна водна ерозія (Регіональна..., 2022). З ґрунту вилучаються мікро- та макроеlementи, що призводить до втрати багатьох водостійких агрегатів із збільшення запиленості та глибини поверхні ґрунту. Орний шар поступово деградує та вимивається, відкриваючи доступ до нижніх ґрунтових горизонтів.

Одна з головних екологічних проблем Житомирської області полягає в управлінні відходами, які є одними з основних джерел забруднення навколишнього середовища та його окремих складових. Основну частину загальної маси відходів області становлять тверді побутові відходи IV класу небезпеки, які видаляються на сміттєзвалища, полігони, накопичувачі тощо (Екологічний..., 2022; Регіональна..., 2022).

На початок 2022 р. в обласному реєстрі місць видалення відходів зареєстровано 6 полігонів і 822 сміттєзвалища (Екологічний..., 2022). Розміщення цих відходів охоплює близько 632 гектари. Більшість із них не виконують технічні вимоги до збе-

рігання відходів, відсутні свердловини для спостереження за змінами стану ґрунтових вод, не дотримуються розміри санітарно-захисних зон тощо. Проблема нагромадження відходів на території Житомирщини пов'язана з недостатньою кількістю та неналежним станом спеціалізованої техніки з видалення відходів; відсутністю спеціалізованих підприємств у сфері поводження з побутовими відходами; недосконалістю санітарного очищення населених пунктів; відсутністю очисних і сортувальних споруд у регіоні.

Найбільшу частку вторинної сировини в регіоні становлять пакувальні відходи (харчових продуктів і споживчих товарів), а також органічні відходи тваринництва та домогосподарств.

За даними (Регіональна..., 2021), протягом 2020 року підприємства та суб'єкти господарювання області накопичили 397 239,1 т відходів I–IV класів небезпеки (статистика за 2021 рік недоступна). Виникнення відходів здебільшого фіксується в районах поблизу промислових зон.

На початок 2023 р. максимальне скупчення полігонів твердих побутових відходів було зафіксовано в Житомирському (342) та Коростенському (259) районах, менше – у Бердичівському (95) (Екологічний..., 2023) (рис. 8).

Полігони відходів розташовані в таких містах, як Бердичів, Житомир, Звягель, Коростень, Коростишів і Радомишль. Найбільший за розміром сміттєвий полігон розміщений у місті Коростені (20,8 га),

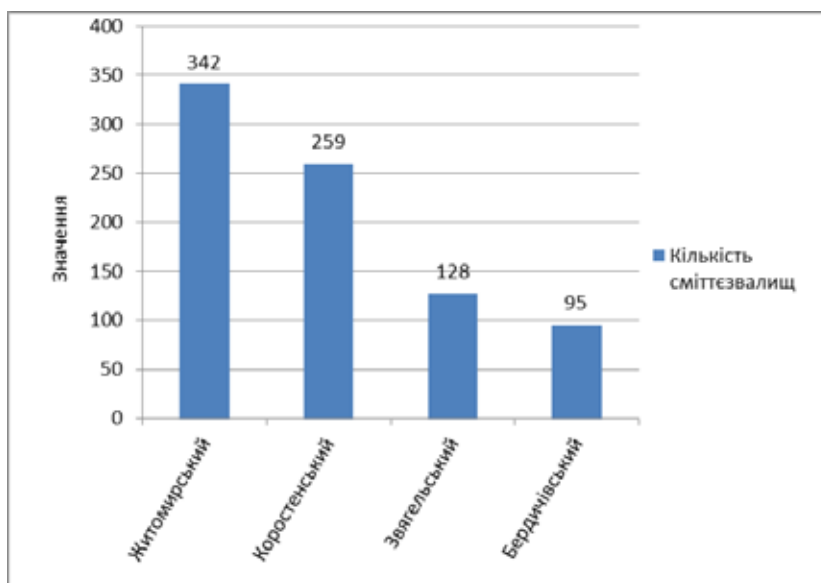


Рис. 8. Розподіл сміттєзвалищ (у одиницях) за районами Житомирщини станом на 2023 р.

а найменший – у Коростишеві (1,9 га).

Упродовж 2020–2021 років Державною екологічною інспекцією Поліського округу не було зафіксовано фактів незаконного ввезення відходів на територію України або їхнього вивезення за її межі (Регіональна..., 2021).

На Житомирщині зустрічається близько 1500 видів судинних рослин, з яких мохоподібні – 294 види, лишайники та ліхенофільні гриби – 240 видів. Домінуючими родинами судинних є: айстрові – 151 вид, злакові – 95 видів, осокові – 76 видів, губоцвіті – 59 видів, бобові та ранникові – по 57 видів, гвоздичні – 54 види, капустяні – 52 види, розові та зонтичні – по 50 видів (Регіональна..., 2022).

До переліку унікальних видів рослинності області входить 227 видів судинних рослин (Регіональна..., 2022). У регіоні 13 видів судинних рослин перебувають під особливою охороною згідно з положеннями Бернської конвенції, чотири види занесені до Червоного списку європейських видів, що перебувають під загрозою зникнення, а 99 – до Червоної книги України (Регіональний..., 2022).

Тваринний світ області відзначається великим різноманіттям. Житомирщина славиться унікальними природними комплексами, у яких проживають рідкісні та види тварин, що потребують охорони через свою нечисленність (Регіональна..., 2022).

Одним із ключових підходів до збереження біологічного різноманіття в Житомирській області є формування природоохоронних територій. Створення заповідних об'єктів сприяє зниженню рівня антропогенного навантаження на компоненти біоти, забезпечує збереження екосистемної цілісності та підтримує природні механізми взаємодії між видами (Про основні засади..., 2019).

Станом на 2023 р. до складу природно-заповідного фонду Житомирської обл. входило 268 об'єктів загальною площею 142 155,3499 га, з них загальнодержавного – 20 об'єктів (57 940,04 га) та місцевого – 248 об'єктів (84 215,3499 га) значень. Частка заповідних територій становить 4,75%.

Відповідно до Указу Президента (Про додаткові заходи..., 2017) метою розширення мережі територій і об'єктів природно-заповідного фонду та забезпечення збереження біорізноманіття у 2022 р. згідно з нормативними документами зазначено такі ландшафтні заказники місцевого значення:

«Любарський», «Трощанський», «Урочище Зікове», «Мокренський», а також ботанічна пам'ятка природи «Поліський дуб». Загалом у 2022 р. площа ПЗФ Житомирської обл. зросла на 548,3575 га (Екологічний..., 2023).

Обговорення

Якість довкілля, зокрема стан атмосферного повітря, має прямий вплив на рівень життя, здоров'я, сталий розвиток і благополуччя населення.

Екологічна політика регіонів України повинна бути спрямована на стабілізацію та покращення стану навколишнього природного середовища в урбанізованих і промислово розвинених зонах, а також на впровадження екологічно безпечних («зелених») технологій у ключових галузях, що мають найбільший вплив на довкілля, зокрема в промисловості, енергетиці, транспорті, будівництві та сільському господарстві.

Для досягнення цих пріоритетів важливо реалізувати такі заходи: встановлення стандартів якості повітря на основі міжнародних стандартів; гармонізація національних стандартів з міжнародними; встановлення нових екологічних правил (нормативів), що базуються на технологічних стандартах і нормах, включно з технологічно пов'язаними стандартами на викиди для основних забруднювачів; розробка цільових програм та планів дій щодо (зменшення нормативних перевищень викидів забруднювачів у містах.

Серед ключових заходів для зменшення потоку забруднювальних речовин в атмосферу Житомирської області є:

- впровадження енергозберігаючих технологій на підприємствах і в житловому секторі;
- розвиток автоматизованих станцій моніторингу якості повітря для своєчасного виявлення забруднень і реагування на надзвичайні ситуації;
- реалізація підприємствами, закладами та компаніями заходів щодо зменшення обсягів їх викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря;
- забезпечення безперебійної та ефективної роботи очисного обладнання;
- впровадження системи роздільного збору та переробки відходів для зменшення забруднення повітря від сміттєспалювальних заводів;
- висадка дерев і створення зелених зон у містах та селищах для природного очищення повітря;
- модернізація транспорту та зменшення викидів від автотранспорту.

Основними заходами для вирішення водно-екологічних проблем, викликаних антропогенним впливом, у територіальних громадах області є:

- реконструкція застарілих і будівництво нових очисних споруд для зменшення скидів забруднювальних речовин у водні ресурси області;
- посилення контролю за забудовою та іншими видами господарської діяльності в межах водоохоронних зон водних об'єктів;
- створення водоохоронних смуг навколо водних об'єктів для зменшення забруднення й ерозії берегів;
- встановлення жорстких норм і контролю за скидами забруднювальних речовин із підприємств та сільськогосподарських об'єктів;
- встановлення системи моніторингу за використанням води в усіх секторах економіки, що дасть змогу своєчасно виявляти та скоригувати порушення;
- проведення інформаційних кампаній щодо важливості збереження водних ресурсів і правильного використання води;
- заохочення мешканців територіальної громади до участі в екологічних проєктах, як-от очищення річок, озер, створення захисних смуг.

Закон України «Про охорону земель» регулює основні напрями різних видів антропогенної діяльності (меліорація, лісове господарство, водне господарство, будівництво та експлуатація цивільних споруд, містобудування тощо) (Про охорону..., 2003).

Боротьбу з ерозійними процесами потрібно здійснювати відповідно до цільових програм і планів на основі землевпорядних, містобудівних та інших ініціатив із забезпечення зростання стійкості території до ерозії. На сільськогосподарських угіддях доцільним є впровадження ґрунтозахисної системи землеробства, що базується на контурно-меліоративній організації території. Такий підхід передбачає диференційоване використання земельних ресурсів з урахуванням особливостей рельєфу місцевості та ґрунтово-екологічних умов. З метою мінімізації обсягів утворення твердих побутових відходів державні органи повинні забезпечити реалізацію комплексу відповідних заходів:

- збільшити участь громадянського суспільства в процесах реформування системи управління відходами;
- запровадити національні програми з роздільного збору відходів;

- готувати фахівців у сфері управління відходами та ресурсами;

- застосовувати заходи для повторного використання природних ресурсів, а також для переробки й утилізації відходів.

- Підвищення рівня обізнаності громадян передбачає такі ключові напрями діяльності:

- інтеграція екологічних предметів у навчальні плани з метою підвищення усвідомлення серед молоді щодо необхідності охорони природи та збереження біорізноманіття;

- використання інтернет-ресурсів для розповсюдження інформації про важливість охорони природи, екологічних загроз і збереження біорізноманіття;

- співпраця з неурядовими організаціями, що займаються охороною навколишнього середовища, для організації інформаційних кампаній, проведення заходів і розповсюдження матеріалів;

- формування усвідомлення переваг правильного поводження з відходами;

- обмін досвідом і співпраця з міжнародними екологічними організаціями для впровадження нових інструментів підвищення рівня поінформованості громадян;

- організація заходів для бізнес-спільноти щодо сталого розвитку й екологічної відповідальності;

- впровадження екологічно безпечних практик у сфері поводження з відходами.

Основними заходами для захисту природних видів фауни, флори та локальних популяцій є (Регіональна..., 2022):

- заохочення фермерів і лісозаготівельників до використання методів, що не завдають шкоди екосистемам;

- обмеження збору біологічних ресурсів для медичних і харчових потреб;

- виявлення та боротьба з міжнародною торгівлею видами, занесеними до Червоної книги;

- удосконалення моніторингу та контролю за виконанням природоохоронних норм і стандартів;

- створення заповідників, національних парків та природних резервів для захисту рідкісних і зникаючих видів та їх середовища існування;

- проведення робіт з відновлення природних ландшафтів, а саме лісів, боліт, водно-болотних угідь, для підтримки біорізноманіття та відновлення популяцій;

- проведення освітніх заходів для населення, спрямованих на підвищення обізна-

ності щодо важливості збереження біорізноманіття регіону.

Висновки

Аналіз сучасної геоecологічної ситуації на території Житомирської області показав, що її стан є задовільним. Зокрема, було встановлено, що основними джерелами забруднення атмосферного повітря є промислові підприємства й автотранспорт. Забруднення водойм значною мірою зумовлене скидами зворотних вод, що їх здійснюють різні підприємства та господарства. У 2022 році в поверхневі води було скинуто 1,284 млн м³ забруднених вод. Основними забруднювачами, що потрапили у водні об'єкти, є розчинені неорганічні солі, важкі метали, а також органічні речовини. Під впливом комп-

лексу природних і техногенних факторів на значних територіях виявлено погіршення едафічного стану. Основними видами відходів у регіоні є тверді побутові та виробничі відходи IV класу небезпеки. Основну частку вторинної сировини становлять відходи упаковки від харчової продукції та товарів широкого вжитку, а також побічні продукти тваринного походження й відходи, що утворюються внаслідок ведення домашнього господарства. Природно-заповідний фонд області налічує 268 об'єктів, з яких 20 мають загальнодержавне значення, а 248 – місцеве. Частка природно-заповідних територій становить 4,75%. Запропоновані заходи з оптимізації сприятимуть поліпшенню геоecологічної ситуації в Житомирській області.

Список використаної літератури

- Боярин М.В., Нетробчук І.М. Основи гідроекології: теорія й практика : навчальний посібник. Луцьк : Вежа-Друк, 2016. 365 с.
- Гавриленко О.П., Шищенко П.Г. Геоecологічні проблеми України : підручник. Київ : ПВТІ «LAT&K», 2022. 379 с.
- Головне управління статистики у Житомирській області [Електронний ресурс]. URL: <https://www.zt.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 06.10.2024).
- Гродзинський М.Д. Ландшафтна екологія : підручник. Київ : Знання, 2014. 550 с.
- Департамент екології та природних ресурсів Житомирської обласної державної адміністрації [Електронний ресурс]. URL: <https://eprdep.zht.gov.ua/> (дата звернення: 15.10.2024).
- Державна служба статистики України [Електронний ресурс]. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 12.12.2024).
- Закон України про охорону земель [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/962-15#Text/> (дата звернення: 12.12.2024).
- Екологічний паспорт Житомирської області за 2022 р. [Електронний ресурс]. URL: <https://eprdep.zht.gov.ua/Ecopasport%202022.pdf/> (дата звернення: 28.11.2024).
- Екологічний паспорт Житомирської області за 2023 р. [Електронний ресурс]. URL: <https://eprdep.zht.gov.ua/Ecopasport%202023.pdf/> (дата звернення: 07.01.2025).
- Койнова І.Б., Стойко С.М. Сучасні види антропогенного впливу на життєве середовище. *Український географічний журнал*. 2012. № 1. С. 50–47.
- Круглов І.С. Геоecологія як трансдисциплінарна наука про геоecосистеми. *Фізична географія і геоморфологія*. 2005. № 47. С. 100–107.
- Круглов І.С. Геоecологія та географія. *Наукові записки Тернопільського державного педагогічного університету. Серія: Географія*. 2004. № 2. Ч. 1. С. 49–55.
- Нестерчук І.К. Геоecологічний аналіз: концептуальні підходи, сталий розвиток : монографія. Житомир : ЖДТУ, 2011. 312 с.
- Про додаткові заходи щодо розвитку лісового господарства, раціонального природокористування та збереження об'єктів природно-заповідного фонду : Указ Президента України від 21.11.2017 № 381/2017 [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/381/2017#Text/> (дата звернення: 03.12.2024).
- Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року : Закон України; Стратегія від 28.02.2019 № 2697-VIII [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text/> (дата звернення: 15.01.2025).
- Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища Житомирської області у 2021 році [Електронний ресурс]. URL: <https://surl.li/qttwaim> (дата звернення: 16.12.2024).
- Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища Житомирської області у 2022 році [Електронний ресурс]. URL: <https://eprdep.zht.gov.ua/Regionalna%20dopovidj%202023.pdf/> (дата звернення: 16.11.2024).

Сак Т.В., Білю І.О., Ткачук Ю.Е. Еколого-економічні наслідки російсько-української війни. *Економіка та суспільство*. 2022. Вип. 38. С. 25–31. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-38-6>.

Смілій 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>.

Стащенко К.А., Костюк В.С. Вплив видобування корисних копалин у Житомирській області на стан природного середовища. *VIII Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми сучасної науки та освіти». Географічні науки*. 2023. С. 5–8.

Федулова І.В. Вплив сільського господарства на екологію. Інформаційна культура в сучасному світі : матеріали наукового семінару. Київ : НТУУ КПІ, 2013. № 2. С. 24–28.

Цілик О.М. Геоекологічна ситуація на Житомирщині та основні чинники її формування : магістр. робота. Житомир, 2024. 71 с.

References

Boiaryn, M.V., & Netrobchuk, I.M. (2016). *Osnovy hidroekologii: teoriia y praktyka: navchalnyi posibnyk* [Fundamentals of hydroecology: theory and practice: a textbook]. Lutsk : Vezha-Druk [in Ukrainian].

Havrylenko, O.P., & Shyshchenko, P.H. (2022). *Heoekologichni problemy Ukrainy: pidruchnyk* [Geoecological problems of Ukraine: Textbook]. Kyiv : PVTP “LAT&K” [in Ukrainian].

Holovne upravlinnia statystyky u Zhytomyrskii oblasti [Main Department of Statistics in Zhytomyr Region]. [Elektronic resource] URL: <https://www.zt.ukrstat.gov.ua/> (access date: 06.10.2024) [in Ukrainian].

Hrodzynskiy, M.D. (2014). *Landshaftna ekolohiia: pidruchnyk* [Landscape Ecology: Textbook]. Kyiv : Znannya [in Ukrainian].

Departament ekolohii ta pryrodnykh resursiv Zhytomyrskoi oblasnoi derzhavnoi administratsii [Department of Ecology and Natural Resources of the Zhytomyr Regional State Administration]. [Elektronic resource] URL: <http://www.eprdep.zht.gov.ua/> (access date: 15.10.2024) [in Ukrainian].

Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy [State Statistics Service of Ukraine]. [Elektronic resource] URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/> (access date: 12.12.2024) [in Ukrainian].

Zakon Ukrainy pro okhoronu zemel [Law of Ukraine on Land Protection]. [Elektronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/962-15#Text/> (access date: 12.12.2024) [in Ukrainian].

Ekolohichniy pasport Zhytomyrskoi oblasti za 2022 r. [Ecological passport of Zhytomyr region for 2022]. [Electronic resource] URL: <https://eprdep.zht.gov.ua/Ekopasport%202022.pdf/> (access date: 28.11.2024) [in Ukrainian].

Ekolohichniy pasport Zhytomyrskoi oblasti za 2023 r. [Ecological passport of Zhytomyr region for 2023]. [Electronic resource] URL: <https://eprdep.zht.gov.ua/Ekopasport%202023.pdf/> (access date: 07.01.2025) [in Ukrainian].

Koinova, I.B., & Stoiko, S.M. (2012). Suchasni vydy antropohennoho vplyvu na zhyttieve sere-dovyshche [Modern types of anthropogenic impact on the living environment]. *Ukrainskyi heohra-fichnyi zhurnal* [Ukrainian Geographical Journal], 1, 50–47 [in Ukrainian].

Kruhlov, I.S. (2005). Heoekolohiia yak transdystsyplinarna nauka pro heoekosystemy [Geoecology as a transdisciplinary science of geoecosystems]. *Fizychna heohrafiia i heomorfologhiia* [Physical Geography and Geomorphology], 47, 100–107 [in Ukrainian].

Kruhlov, I.S. (2004). Heoekolohiia ta heohrafiia [Geoecology and geography]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu. Seriya: Heohrafiia* [Scientific notes of the Ternopil State Pedagogical University. Series: Geography], 2 (1), 49–55 [in Ukrainian].

Nesterchuk, I.K. (2011). Heoekolohichniy analiz: kontseptualni pidkhody, stalyy rozvytok: monohrafiia [Geoecological analysis: conceptual approaches, sustainable development: mono-graph]. Zhytomyr : ZhDTU [in Ukrainian].

Pro dodatkovi zakhody shchodo rozvytku lisovoho hospodarstva, ratsionalnoho pryrodokorystu-vannia ta zberezhennia ob'ektiv pryrodno-zapovidnoho fondu (2017) [On additional measures for the development of forestry, rational use of nature and preservation of objects of the nature reserve fund: Decree of the President of Ukraine dated 21.11.2017 № 381/2017]. [Elektronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/381/2017#Text/> (access date: 03.12.2024) [in Ukrainian].

Pro Osnovni zasady (stratehiu) derzhavnoi ekolohichnoi polityky Ukrainy na period do 2030 roku: Zakon Ukrainy [On the Basic Principles (Strategy) of the State Environmental Policy of Ukraine

for the Period Until 2030: Law of Ukraine]. [Electronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text/> (access date: 15.01.2025) [in Ukrainian].

Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha Zhytomyrskoi oblasti u 2021 rotsi [Regional report on the state of the environment of Zhytomyr region in 2021]. [Electronic resource] URL: https://surl.lt/ngpaoz_ (access date: 16.12.2024) [in Ukrainian].

Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha Zhytomyrskoi oblasti u 2022 rotsi [Regional report on the state of the environment of Zhytomyr region in 2022]. [Electronic resource] URL: <https://eprdep.zht.gov.ua/Regionalna%20dopovidj%202023.pdf/> (access date: 16.11.2024) [in Ukrainian].

Sak, T.V., Bilo, I.O. & Tkachuk Yu.E. (2022) Ekoloho-ekonomichni naslidky rosiisko-ukrainskoi viiny [Environmental and economic consequences of the Russian-Ukrainian war]. *Ekonomika ta suspilstvo [Economy and Society]*, 38, 25–31. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-38-6>.

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

Stashenko, K.A., & Kostiuk, V.S. (2023). Vplyv vydobuvannia korysnykh kopalyn u Zhytomyrskii oblasti na stan pryrodnoho seredovyscha [The impact of mineral extraction in Zhytomyr region on the state of the natural environment]. *VIII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia "Aktualni problemy suchasnoi nauky ta osvity". Heohrafichni nauky [VIII International Scientific and Practical Conference "Actual Problems of Modern Science and Education". Geographical Sciences]*, 5–8 [in Ukrainian].

Fedulova, I.V. (2013). Vplyv silskoho hospodarstva na ekolohiiu. Informatsiina kultura v suchasnomu sviti: materialy naukovooho seminaru [The impact of agriculture on ecology. Information culture in the modern world: materials of a scientific seminar]. Kyiv : NTUU KPI, 2, 24–28 [in Ukrainian].

Tsilyk, O.M. (2024). Heoekolohichna sytuatsiia na Zhytomyrshchyni ta osnovni chynnyky yii formuvannia: mahist. robota [Ecoecological situation in the Zhytomyr region and the main factors of its formation: master's thesis], 71 [in Ukrainian].

Отримано: 25.04.2025
Прийнято: 15.05.2025



УДК 551.524:504.3

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.8>

ДИНАМІКА МІСЬКОГО ОСТРОВА ТЕПЛА НАД ЛУЦЬКОМ ПРОТЯГОМ 2013–2023 РОКІВ

В. В. Федонюк¹, С. О. Пугач², М. А. Федонюк³

У ХХІ столітті рівень урбанізації постійно зростає як у світі, так і в Україні. У Волинській області найбільшим містом є Луцьк. У Луцьку, як і в будь-якому великому місті, формується свій мікроклімат, особливості якого визначаються характером діяльної поверхні та циркуляційних атмосферних процесів, рельєфом, розподілом водних об'єктів і зелених зон, розташуванням промислових зон та іншими природними й антропогенними чинниками. Одним із проявів впливу великого міста на регіональні особливості клімату є формування міського острова тепла. Явище острова тепла впливає на роботу міських комунальних служб і транспорту, воно може призводити до змін місцевого мікроклімату, наприклад, посилювати дискомфорт мешканців міст улітку внаслідок впливу гіпертермії. Тому його дослідження є актуальним науковим завданням. Мета роботи – дослідження умов формування, динаміки, структури й екологічних наслідків утворення міського острова тепла в Луцьку. Завдання роботи: 1) за допомогою порівняльного аналізу космічних супутникових інфрачервоних знімків території Луцька оцінити поширення й походження осередків формування острова тепла над містом у річній динаміці та за різних погодних умов протягом періоду 2013–2023 років; 2) провести серію інструментальних вимірювань температури повітря в Луцьку й околицях з наступним оцінюванням результатів; 3) дослідити наявність зв'язку між типом і характером метеорологічних умов та проявами острова тепла; 4) розробити пропозиції щодо покращення мікроклімату міста та його окремих мікрорайонів у контексті проблеми, яка вивчалася.

Методи аналізу проблеми: у процесі підготовки роботи використовувалися аналітичний, описовий, порівняльно-оціночний, математично-статистичний і графічний методи. Застосовано

¹ кандидат географічних наук, доцент,
доцент кафедри екології
(Луцький національний технічний університет, м. Луцьк)
e-mail: ecolutsk@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1880-6710

² доктор географічних наук, професор,
професор кафедри економічної та соціальної географії
(Волинський національний університет імені Лесі Українки, м. Луцьк)
e-mail: puhachserhiy@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3738-7961

³ кандидат географічних наук, доцент,
доцент кафедри екології
(Луцький національний технічний університет, м. Луцьк)
e-mail: m.fedoniuk@lntu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-4034-3695

типові методики й алгоритми статистичного та графічного аналізу у програмі "MS Excel", інструментальний і картографічний методи.

Результати: визначено умови формування та річну динаміку міського острова тепла в Луцьку; виділено райони та ділянки міста із сильними проявами підвищених значень температури повітря і діяльної поверхні; оцінено відмінності полів температури в місті та на приміській території; розроблено серію графіків, діаграм, картограм за результатами інструментальних вимірів та їх аналізу; розроблено пропозиції щодо покращення мікроклімату міста та його окремих мікрорайонів. Новизна дослідження полягає в тому, що вперше проведено детальний аналіз проявів міського острова тепла над Луцьком із застосуванням поєднання методів ДЗЗ та інструментального аналізу. Практичне застосування одержаних результатів можливе в галузі планування містобудівних заходів з адаптації до кліматичних змін і наростання випадків прояву періодів екстремальної спеки (озеленення, енергоощадні технології, планування мережі штучних водних об'єктів у місті, оптимізація роботи комунальних структур і транспорту).

Ключові слова: міський острів тепла, Луцьк, температура повітря, температура діяльної поверхні, дистанційне зондування Землі.

DYNAMICS OF THE URBAN HEAT ISLAND OVER LUTSK DURING 2013–2023

V. V. Fedoniuk, S. O. Pugach, M. A. Fedoniuk

In the 21st century the level of urbanization is constantly growing both in the world and in Ukraine. In the Volyn region, the largest city is Lutsk. In Lutsk, as in any large city, its own microclimate is formed, the features of which are determined by the nature of the underlying surface and circulation processes in the atmosphere, relief, distribution of green areas and water bodies, location of industrial zones and other natural and anthropogenic factors. One of the manifestations of the influence of a large city on regional climate features is the formation of an urban heat island. The phenomenon of a heat island affects the work of urban utilities and transport, it can lead to changes in the local microclimate, for example, increase the discomfort of city residents in the summer due to the influence of hyperthermia.

Therefore, its study is an urgent scientific task.

The purpose of the work – research into the conditions of formation, dynamics, structure and environmental consequences of the urban heat island in Lutsk. Tasks of the work: 1) using a comparative analysis of space satellite infrared images of the Lutsk territory, assess the distribution and origin of heat island formation centers over the city in annual dynamics and under different weather conditions during the period 2013–2023; 2) conduct a series of instrumental measurements of air temperature in Lutsk and its surroundings with subsequent evaluation of the results; 3) investigate the existence of a connection between the type and nature of meteorological conditions and manifestations of the heat island; 4) develop proposals for improving the microclimate of the city and its individual microdistricts in the context of the problem being studied.

In the process of preparing the work, analytical, descriptive, comparative-evaluative, mathematical-statistical and graphic methods were used. Typical methods and algorithms of statistical and graphic analysis in MS Excel, instrumental and cartographic methods.

The conditions for the formation and annual dynamics of the urban heat island in Lutsk were determined; areas and sections of the city with strong manifestations of elevated air temperature and active surface were identified; differences in temperature fields in the city and in the suburban area were assessed; a series of graphs, diagrams, cartograms were developed based on the results of instrumental measurements and their analysis; proposals were developed to improve the microclimate of the city and its individual microdistricts. The novelty of the study lies in the fact that for the first time a detailed analysis of the manifestations of the urban heat island over Lutsk was carried out using a combination of remote sensing methods and instrumental analysis. The practical application of the obtained results is possible in the field of planning urban development measures to adapt to climate change and the increase in cases of periods of extreme heat (greening, energy-saving technologies, planning a network of artificial water bodies in the city, optimization of the work of municipal structures and transport).

Key words: urban heat island, Lutsk, air temperature, active surface temperature, remote sensing of the Earth.

Вступ

У ХХІ ст. велика кількість жителів Землі проживає в містах. Рівень урбанізації

постійно зростає і в Україні. Луцьк – це місто, яке стрімко розвивається та розширює свою площу. У Луцьку формується

власний мікроклімат, особливості якого визначаються характером діяльної поверхні та циркуляційних процесів в атмосфері, рельєфом, розподілом зелених зон та водних об'єктів, розміщенням промислових зон та іншими чинниками. Одним із проявів впливу великого міста на місцеві особливості клімату є формування міського острова тепла. Згідно з визначенням Усесвітньої метеорологічної організації (WMO), острів тепла (Urban Heat Island, UHI, або міський тепловий острів (далі – МТО)) – це явище підвищених показників температурного поля над територією міста порівняно з його околицями, яке має просторову та часову, сезонну та добову динаміку (Свінціцька, 2016).

Зміни температурного режиму пов'язані з антропогенним тепловим забрудненням, із заміною в місті природних поверхонь, укритих рослинністю, на асфальтові чи бетонні, які інакше поглинають і відбивають сонячну радіацію; опалення приміщень у холодну пору року посилює ефект острова тепла, діють також інші чинники. Явище острова тепла може призводити до змін міського мікроклімату, наприклад, посилювати дискомфорт мешканців улітку внаслідок гіпертермії. Усе це визначило актуальність теми даної наукової роботи.

Об'єктом дослідження є температурне поле міста Луцька та його динаміка протягом періоду 2013–2023 рр.

Мета роботи – дослідження умов формування, динаміки, структури й екологічних наслідків утворення міського острова тепла в місті Луцьку.

Завдання роботи: 1) за допомогою порівняльного аналізу космічних супутникових інфрачервоних знімків, вибраних за період 2013–2023 рр., оцінити поширення й походження осередків формування острова тепла над Луцьком у річній динаміці та за різних погодних умов; 2) провести серію інструментальних вимірювань температури повітря протягом холодного періоду 2023–2024 рр. у Луцьку й околицях з наступним оцінюванням одержаних результатів; 3) дослідити наявність зв'язку між типом і характером метеорологічних умов та проявами острова тепла; 4) розробити пропозиції щодо покращення мікроклімату міста в контексті проблеми, яка вивчалася.

Практичне значення дослідження полягає в тому, що його результати можуть використовуватися в освітній і навчальній діяльності, для вирішення завдань планування

міської території, розміщення нових промислових об'єктів або збільшення потужностей вже наявних, забудови та реконструкції мікрорайонів Луцька, для оцінювання екологічного стану території тощо.

Перший аналіз островів тепла в місті розпочався ще в XIX ст. Поняття міського острова тепла (Urban Heat Island, UHI) увів Л. Говард, який проводив аналіз для Лондона в 1818 р. (Клімат ..., 2010). Проте активні дослідження для різних міст і регіонів проводилися вже у другій половині XX ст. У 60–70-ті рр. XX ст. американські та європейські вчені кількісно оцінили потоки антропогенного тепла в містах. Було опубліковано наукові праці щодо острова тепла Г. Лансберга, А. Розенфельда, Х. Тахи, які зараз вважаються класичними (Свінціцька, 2016; Федонюк і Федонюк, 2017). У них проведено аналіз впливу окремих природних і антропогенних чинників. Досліджувались альbedo поверхонь, особливості конвекції та турбулентності, впливу озеленення на тепловий режим, відмінності у використанні штучних матеріалів чи планувальних містобудівних рішень.

У наш час такі дослідження продовжуються. Зокрема, аналізуються проблеми й перспективи використання методів дистанційного зондування для аналізу проявів міських островів тепла (Dien et al., 2024); розробляються математичні моделі прогнозування поширення та інтенсивності цих островів (Tehrani et al., 2024); вивчається потенційний еволюційний вплив островів тепла на фенотипи живих організмів (Sarah & Martin, 2020); досліджуються практичні можливості пом'якшення впливу таких островів шляхом розвитку багаторівневої зеленої інфраструктури в містах (Wu et al., 2024). Окремі праці присвячені підсумковому аналізу та класифікації типів, категорій і спрямованості наукових досліджень міських островів тепла (Qin et al., 2024).

Для України прояви островів тепла вперше вивчалися наприкінці XX ст. в серії монографій, присвячених мікроклімату 9 великих міст: Києва, Одеси, Харкова, Полтави, Дніпропетровська, Чернівців, Львова, Вінниці та Луцька (Шевченко та ін., 2011; Свінціцька, 2016). Найдетальніше проблема була досліджена для Києва в оновленому виданні монографії (Клімат ..., 2010).

У XXI ст. дослідження міських островів тепла в Україні було продовжено. Зокрема, вивчався їхній вплив на мікроклімат міських мікрорайонів та прилеглої приміської

території (Шевченко та ін., 2011; Артамонов, 2013); аналізувалися прояви островів тепла над окремими містами України – Києвом (Шевченко та ін., 2011; Лялько та ін., 2016), Львовом (Шуплат, 2022; Кучерявий та ін., 2023), Харковом (Матвієнко, 2019), Одесою (Маринін і Дранічер, 2013), Луцьком (Романюк та ін., 2024). Актуальними напрямками досліджень є аналіз проявів міських островів тепла в контексті адаптації до кліматичних змін (Адаптація ..., 2016) та вивчення можливостей зниження негативних наслідків цих проявів шляхом упровадження зелених екодахів (Гречко, 2022), вертикального та горизонтального озеленення і спеціального підбору культур для нього (Нужина та ін., 2022). Вказані праці були враховані у формулюванні висновків і рекомендацій щодо зниження проявів острова тепла в Луцьку.

З появою у вільному доступі масивів космічних знімків, зокрема – зроблених в інфрачервоному діапазоні, розпочалося вивчення островів тепла із застосуванням методів ДЗЗ (Зацерковний та ін., 2018; Федонюк і Федонюк, 2017). Багато праць вказаного напрямку виконано науковцями ДУ «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАНУ» (Лялько та ін., 2016), які провели аналіз теплових полів Києва за супутниковими інфрачервоними знімками, запропонували методику обробки й інтерпретації таких знімків. Елементи цієї методики було використано авторами під час підготовки статті.

Для міст Волині вивченню міських островів тепла були присвячені лише окремі роботи, що підтверджує актуальність вибраної теми. Зокрема це праці, які розглядали прояви острова тепла для Луцька (Тарасюк і Тарасюк, 2014; Федонюк і Федонюк, 2017; Нетребчук та ін., 2018; Романюк та ін., 2024) та дослідження щодо Нововолинська (Стельмах і Нетребчук, 2023).

Матеріал і методи

Для оцінювання та порівняння теплового режиму та температурних відмінностей м. Луцька і його околиць було використано можливості та матеріали ресурсу “Land Viewer”. У процесі дослідження проаналізовано дані супутникових знімків в інфрачервоному тепловому каналі THERMAL INFRARED супутників Landsat-8. Landsat – це супутники Геологічної служби США, дані комплексу Landsat-8 доступні користувачам за період із 2013 р. З урахуванням періодичності прольоту супутника над нашою терито-

рією (кожні 8 днів) за період 2013–2023 рр. на сервісі щороку доступні до 46 космічних знімків території Луцька. Використано фільтр за хмарністю 13%, частину знімків також відбраковано як неякісні. Усього за 2013–2023 рр. було знайдено й описано 58 знімків доброї якості. На ці знімки було також накладено контур Луцька, для кращої просторової візуалізації та порівняння. Для кожного з 58 знімків проводилися комплексний візуальний аналіз і порівняння з фактичними метеорологічними умовами відповідної доби. Метеоумови були описані на основі даних електронного архіву сайту (Метеопост ..., 2023) і даних Волинського обласного центру з гідрометеорології. Аналіз метеопказників дозволив оцінити зв'язок між погодою і проявами острова тепла.

Інфрачервоні чорно-білі теплові знімки THERMAL INFRARED дозволяють аналізувати температуру окремих об'єктів та ділянок на поверхні землі. Що вища температура, то світлішим, білішим є колір ділянки на знімку, і навпаки. Серед досліджених 58 знімків детально описувалися ті, які чітко показують острів тепла над Луцьком, його складники, сегменти, дають змогу оцінити відмінності та динаміку теплових показників міста та приміських територій у просторі та часі. Статистичні обчислення та побудова графіків проведені з використанням інструментів MS Excel. Виконано також картографічне представлення отриманих результатів із використанням програми “Surfer”.

Аналіз даних ДЗЗ було доповнено інструментальним вивченням особливостей динаміки температурного режиму Луцька та його околиць.

Восени 2023 р. в Луцьку було встановлено 6 автоматичних датчиків температури Temperature Data Logger RC-5 USB. Після проведення тестових випробувань датчики розпочали роботу 20 листопада, приблизно 20 грудня було проведено перше контрольне знімання показників, 10 січня – друге. Такий тип датчика є реєстратором температури багаторазового використання з автоматичним генеруванням PDF-звіту. Він сумісний із комп'ютером, дані можуть бути збережені у форматі *.xls для подальшого аналізу й обробки.

Точки встановлення датчиків вибиралися таким чином, щоб розмістити їх як у центральних районах міста, у житлових і селітебних зонах, так і на околицях і у приміській зоні. Виміри температури проводилися через інтервал 30 хв.

Використані методи дослідження: аналітичний, порівняльно-оцінковий, описовий, статистично-математичний, графічний, картографічний, методи інформаційно-комунікаційних технологій (далі – ІКТ), методи дистанційного зондування Землі (далі – ДЗЗ).

Результати

Результати аналізу вибірки 58 космічних знімків, зроблених в інфрачервоному діапазоні, за різні роки (2013–2023 рр.), пори року (літо, осінь, зима, весна) та за різних метеорологічних умов, дозволяють установити, що острів тепла над Луцьком виражений, температурні поля міста та його околиць мають відмінності, а їх геопросторовий розподіл залежить як від сезону року, так і від метеоумов. На рис. 1 представлено порівняння теплових знімків із вираженням островом тепла в теплий і холодний періоди року. Бачимо, що на зимових знімках міський острів тепла простежується чітко, захоплює значну територію, а на літніх – локально, островцями та плямами.

Територія Луцька має складну просторову ландшафтну структуру. Тому острів тепла зазвичай сегментований, розділений на сектори й елементи, які можемо виділити, наприклад, на знімку за 5 червня 2015 р. (рис. 2). Як бачимо, просторовий розподіл острова тепла має неоднорідний характер. Його окремі елементи проявляються у формі світлих плям із вираженими, не надто розсіяними краями. Видно їх локаль-

ний характер. Окремі об'єкти (наприклад, завод КРЗ, котельні в районі 40-ого кварталу, ТРЦ «Адреналін» можуть об'єднуватися в сегменти – сегмент Північної промислової зони). Під час проведення аналізу зон, де є найбільші локальні теплові островці, видно, що це промислові підприємства (наприклад, ПрАТ СКФ «Україна», «Terichem» – виробник полімерних плівок, «Modern-Expo» – виробник торгового обладнання, ТОВ «Кромберг енд Шуберт», а також Північна промислова зона), транспортні вузли і розв'язки (наприклад, Київ – Дубно на вул. Рівненській, автостоянки), дороги з інтенсивним трафіком (вул. Рівненська, Дубнівська, Ковельська, Центр), великі торгові центри, гіпермаркети («Епіцентр», «Нова лінія»), очисні споруди.

Аналіз рис. 2 та даних табл. 1 також підтверджує, що за будь-яких метеорологічних умов у безвітряну погоду острів тепла проявляється значно помітніше. Після порівняння теплових знімків, які стосуються різних сезонів, бачимо, що на зимових знімках острів тепла видно дуже чітко, він охоплює велику площу, а на літніх знімках острів виражений більш локально.

Отже, аналіз теплових знімків показав, що в холодну морозну погоду температурний контраст міста й околиць є сутєвим. Виділяються житлові мікрорайони (часто з контурами будинків), дороги (формують характерну «павутину»). Узимку формується острівець тепла над очисними спорудами

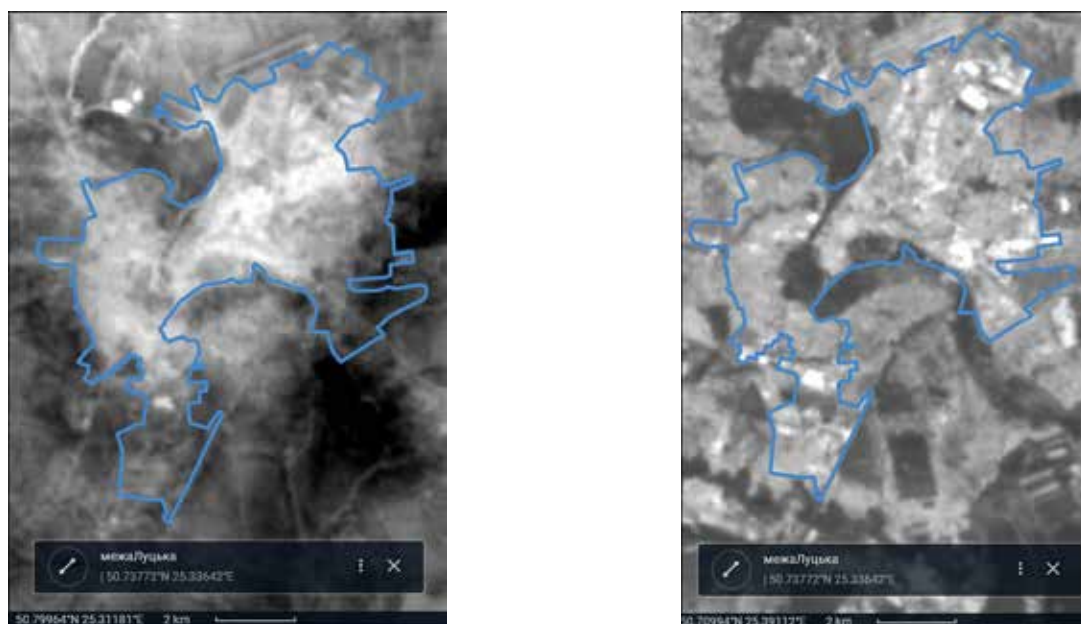


Рис. 1. Порівняння теплових знімків у теплий і холодний періоди року: зліва – знімок супутника Landsat-8, зроблений узимку, 26 січня 2017 р., справа – улітку, 5 червня 2015 р.

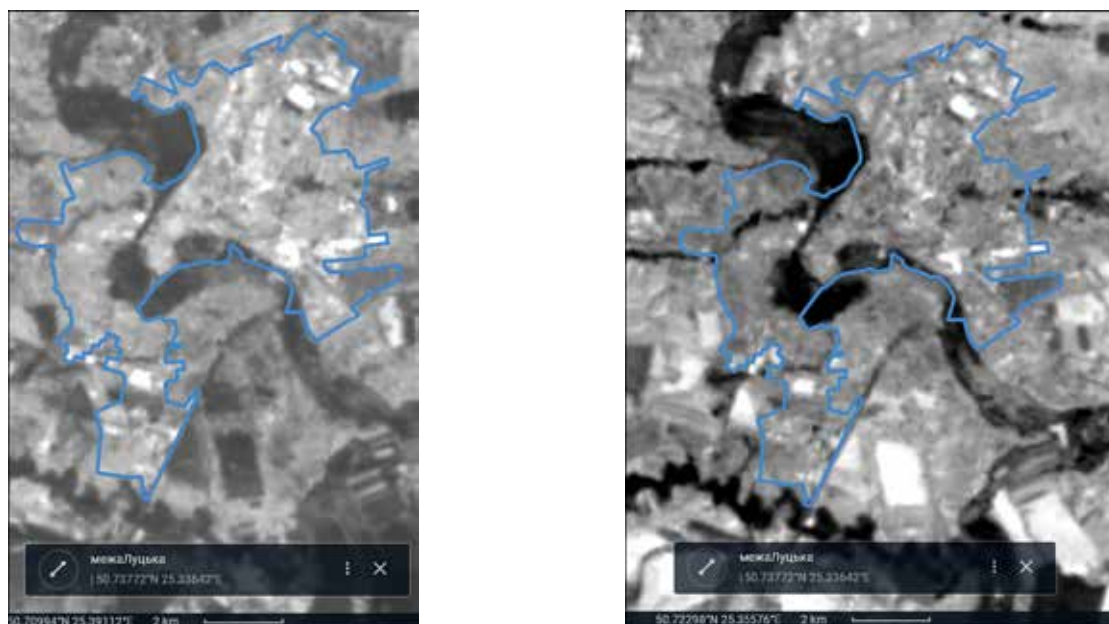


Рис. 2. Порівняння теплових знімків Луцька, зроблених за різної швидкості вітру за схожості температурних умов (зліва – 5 червня 2015 р., справа – 2 вересня 2015 р.)

Таблиця 1

Погодні умови в Луцьку 5 червня 2015 р. та 2 вересня 2015 р.

Дата спостереження	Середня температура повітря, °C	Min температура повітря, °C	Max температура повітря, °C	Відносна вологість, %	Швидкість вітру, м/с	Середній атмосфер. тиск, гПа	Хмарність неба, бали
5 червня 2015 р.	+21,9	+8,5	+22,5	52	1,5	1 027,4	0,9
2 вересня 2015 р.	+22,5	+9,3	+24,1	55	4,0	1 008,3	1,0

(північно-західна околиця міста). Очевидно, температура відпрацьованих стічних міських вод є високою, ці скиди змінюють також і тепловий баланс р. Стир, за течією на знімках видно підвищення температури води.

Детальне вивчення 58 космічних знімків дозволяє оцінити річну динаміку острова тепла та його поширення. У Луцьку прояви острова тепла є не зовсім класичними, описаними в науковій літературі (з максимальним проявом острова тепла взимку). У Луцьку в теплий період (травень – жовтень) спостерігалось набагато більше проявів виразного острова тепла, аніж в холодний період (листопад – березень). Припускаємо, що така динаміка пов'язана зі скороченням тривалості періодів залягання стійкого снігового покриву в Луцьку.

У річній динаміці найчіткішими є прояви острова тепла в липні, серпні та січні. Деякі знімки за вересень і травень за умови вста-

новлення «літньої» жаркої, сухої чи помірно вологої погоди демонстрували також високу вираженість острова тепла. Водночас на знімках за грудень і лютий локалізація острова тепла виражена мало. На нашу думку, це також пов'язано зі скороченням тривалості стійкого снігового покриву в холодний період року на Волині, що є одним із проявів глобального потепління клімату. Що стосується більшості знімків, віднесених до перехідних сезонів року (весна – осінь), то локалізація острова тепла в цей період розмита, частіше він проявляється окремими плямами, осередками, які легко прив'язуються до окремих господарських чи промислових об'єктів у місті (крупні котельні, заводи, великі гіпермаркети, ТЦ з їхніми вентиляційними системами, очисні споруди міської каналізації тощо).

В окремі періоди виявлені ділянки підвищених температур на територіях, що оточу-

ють м. Луцьк. Серед причин появи островців тепла на приміській території виділимо такі чинники: а) спалювання сухою та стерні в період весняних і осінніх польових робіт на сільськогосподарських угіддях і дачних масивах; б) прогрівання темних розораних ділянок сільгоспугідь навесні та наприкінці літа (жнивів); в) сильне прогрівання заасфальтованих ділянок улітку (гаражні кооперативи, механізовані ділянки в селах тощо).

У таблиці 2 та на рис. 3–4 представлено інтегровані результати інструментального аналізу температури повітря автоматичними датчиками в 6 точках. Дані таблиці (див. табл. 2) та картограми (див. рис. 4) показують, що найвищі середні та максимальні температури повітря спостерігалися в центральних мікрорайонах Луцька, які щільно забудовані, мають висотну забудову, густу транспортну мережу,

Таблиця 2

Осереднені результати автоматичного моніторингу температури повітря в м. Луцьку й околицях

Температурний показник	Датчик 1, вул. Львівська, Університет	Датчик 2, мікрорайон Вересневе, вул. Далека	Датчик 3, село Боратин	Датчик 4, просп. Молоді, 33-й квартал	Датчик 5, дачний масив Промінь	Датчик 6, мікрорайон Красне
Середня температура, °C	0,389	0,200	1,635	1,487	0,282	1,314
Максимальна температура, °C	2,802	2,125	3,267	3,763	2,404	4,389
Мінімальна температура, °C	-2,121	-1,827	-0,187	-0,654	-1,771	-1,443
Амплітуда температури, °C	4,923	3,952	3,454	4,417	4,175	5,832

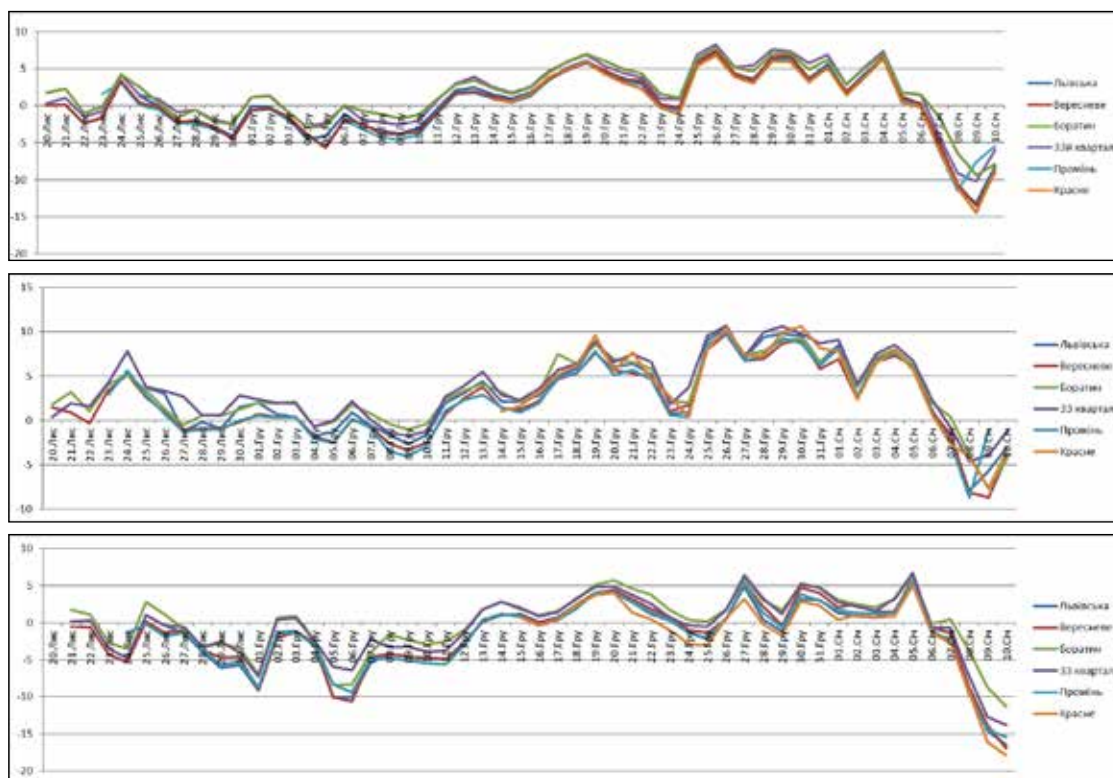


Рис. 3. Динаміка температури повітря t^0 , визначеної автоматичними датчиками, 20 листопада 2023 р. – 10 січня 2024 р. Середні добові, максимальні добові та мінімальні добові температури (вертикальна вісь – значення t^0 , °C)

поєднують житлові квартали та селітебні зони (33-й квартал, Красне). Підвищені температури (середні, максимальні) відмічені й у с. Боратин, куди зміщується острів тепла. Знижені температури характерні для міських околиць, прилеглих до міста дачних масивів (Вересневе, вул. Далека; Промінь), які не розташовані на осі переважних вітрів. Різниця середніх температур між точками може досягати 1,5 °С. Найнижча мінімальна температура й одна з найбільших амплітуд температури спостерігалися в районі вул. Львівської, це пов'язано з тим, що вулиця – одна з магістралей, яка є аераційним коридором, напрямок її збігається з напрямком переважних вітрів. Проте найвища амплітуда температур і найвища максимальна температура були зафіксовані в районі Красного – припускаємо, що причиною є спиртзавод та його теплі щоденні викиди в атмосферне повітря.

Аналіз картограм температурних показників досліджуваного періоду (див. рис. 4) підтверджує наявність над містом острова тепла в холодну пору року з його зміщенням у східному, південно-східному, південному напрямках.

Оскільки датчики робили виміри кожні 30 хв, результати дозволяють оцінити також добову мінливість температури. Загалом добовий хід був типовим для кліматичної зони, але було виявлено періодичні різкі підвищення температури на 1,5–2,5 °С за датчиком 3 (Красне), вони спостерігалися майже щоденно, о 12:45–13:00 год, за винятком періоду 1 січня 2024 р. – 7 січня 2024 р. Припускаємо, що це наслідок залпових викидів нагрітих газів на спиртзаводі.

Обговорення

Теплове забруднення є одним із найпоширеніших видів фізичних антропогенних забруднень у місті. Утворення острова тепла в основному пов'язане з антропогенними перетвореннями діяльної поверхні. Заасфальтовані та забетоновані ділянки, стіни будівель, споруд у денні години накопичують деяку кількість тепла, а вночі віддають його навколишньому повітрю. У містах також зменшені транспірація і випаровування із ґрунту, (мало природних ландшафтів), що підсилює прояви острова тепла. У місті багато джерел прямих теплових викидів (будинки, автотранспорт, котельні тощо). Острів тепла не є стаціонарним і може проявляти динаміку у просторі та в часі, має добовий і річний хід. Удень різниця температур між містом і замиською територією незначна. Проте вночі в місті тепліше, ніж на околицях.

На формування та інтенсивність острова тепла в Луцьку впливає низка чинників: 1) *погода*. Найсуттєвіший вплив мають хмарність неба та вітер. Розміри острова є найбільшими за безвітряної і ясної погоди. Сильний вітер переміщує повітря та приводить до зменшення острова тепла. Для невеликих міст швидкості вітру в 4 м/с може бути досить для зникнення острова тепла. У хмарні дні надходить менше прямої сонячної радіації та зменшено нагрівання поверхонь; уночі хмарність теж зменшує прояви острова. Луцьк розташований у зоні помірно-континентального клімату, під впливом повітряних мас, що надходять з Атлантики. Для міста характерні висока вологість повітря, помірні температури, значна кількість атмосферних опадів, вітер до 3–4 м/с, що

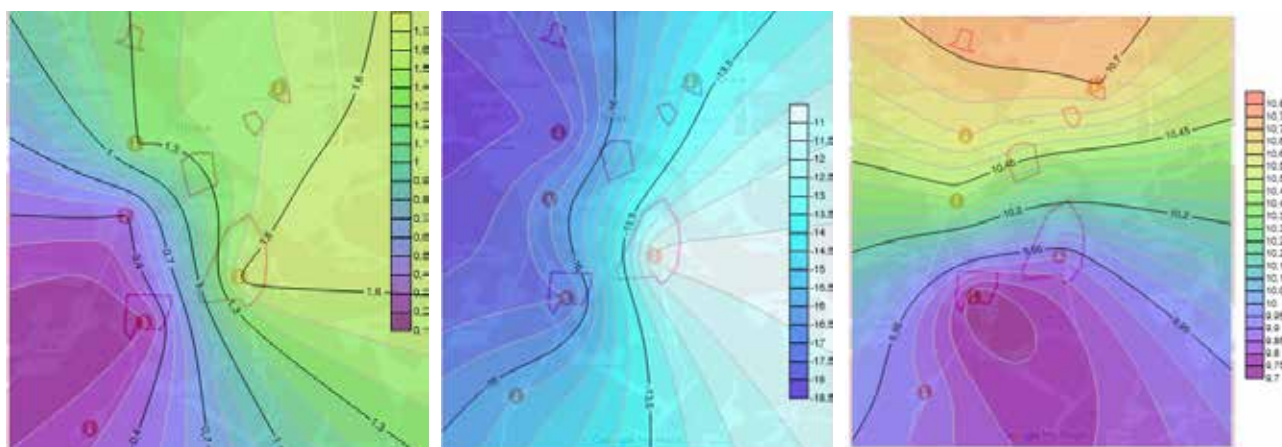


Рис. 4. Картограма розподілу середніх, мінімальних і максимальних значень температури повітря t° в Луцьку й околицях (шкали значення t° – $^\circ\text{C}$)

сприяє формуванню острова тепла; 2) *географічне положення*. Впливає на формування острова, через клімат регіону (режим хмарності, вітровий режим, інсоляція); 3) *сезон року, час доби*. За сприятливих умов для розвитку острова тепла вдень різниці температур у місті та на приміських територіях зазвичай невелика, найбільші контрасти температури проявляються через 2–3 години після заходу сонця. У великих містах острів тепла зберігається в нічний час до сходу сонця і збільшує мінімальну температуру повітря зранку; 4) *функції міста та панівні види антропогенної діяльності*. Значна кількість тепла виділяється під час діяльності, пов'язаної зі спалюванням різних видів палива. Штучний підігрів повітря підсилюється взимку. У Луцьку помітний вплив на формування острова здійснюють великі промислові об'єкти, автошляхи, великі спальні житлові мікрорайони та крупні торгові центри; 5) *розміри міста*: його конфігурація, площа міської забудови, ступінь зміни умов діяльної поверхні чи кількість тепла, яка виробляється; 6) *міський рельєф*. Прояви теплового острова перебувають у прямій залежності від особливостей рельєфу місцевості. У рельєфі Луцька виділяються висотні перепади долини річки Стир та її приток; 7) *наявність водних об'єктів і зелених зон*. Водні плеса є найбільш холодними діяльними поверхнями в містах удень і одними з найтепліших уночі, особливо в ранкові години. У Луцьку до найбільших водних об'єктів, які впливають на сегментування острова тепла, належать р. Стир, її притоки – Сапалаївка, Омеляник, Черногузка, Жидувка. Великі зелені зони – парки та сквери міста, також впливають на його сегментування.

Отже, міський острів тепла, що є вираженим над Луцьком у різні сезони року, – це цікаве явище, що впливає на мікроклімат і екологію міста. До наслідків виникнення в місті острова тепла належать такі явища та процеси: 1) формування своєрідної циркуляції (сільський бриз) і купола забрудненого повітря над центром міста; 2) збільшення тривалості безморозного періоду, зростання вегетаційного періоду, скорочення тривалості заморозків, часу залягання снігового покриву, частоти випадання снігу; 3) зростання випадків гіпертермії, зростання споживання води та появи фотохімічних смогів улітку. Наявність острова тепла має також низку наслідків соціально-економічного характеру: зниження

потреб в опаленні взимку та зростання необхідності кондиціонування повітря влітку. Міський острів тепла впливає на роботу транспорту, міського комунального господарства, енергетичних мереж.

Висновки

Проведене дослідження динаміки острова тепла в Луцьку та його впливу на мікроклімат міста дозволяє зробити такі висновки:

1) над Луцьком формується міський острів тепла, що має виражену структуру, сезонну й річну динаміку. Його утворення залежить від антропогенних і природних чинників, серед яких – перетворення людиною діяльних поверхонь у місті та трансформація потоків тепла;

2) варто виокремити такі особливості острова тепла над містом:

– над Луцьком формується острів тепла, який частіше виразно проявляється в теплий період (травень – жовтень), ніж у холодний (листопад – березень), що пов'язано зі скороченням періодів залягання стійкого снігового покриву;

– аналіз 58 космічних знімків за період 2013–2023 рр. показав чітку, просторово окреслену структуру міського острова тепла, він часто практично збігається з контурами м. Луцька, особливо в періоди з морозною, холодною погодою, з наявним сніговим покривом узимку, а також із дуже жаркою, сухою чи помірно вологою, безвітряною та малохмарною погодою влітку. За всіх типів погоди чіткішими є прояви острова тепла у штильову, безвітряну погоду;

– за будь-яких типів погодних умов на знімках простежуються сталі осередки тепла: міські очисні споруди, найбільші промислові підприємства, гіпермаркети й торгові центри, дві промислові зони (Північна, зона в районі вул. Рівненської, та Привокзальна). Було виявлено посилення із часом проявів теплових плям деяких із цих осередків (наприклад, ТОВ «Кромберг енд Шуберт», що пов'язано зі збільшенням виробничих потужностей і площ підприємств);

– найчастіше острів тепла є сегментованим; на два найбільші сегменти його ділить р. Стир; локальними осередками острова тепла в Луцьку є «спальні» житлові мікрорайони, а серед окремих об'єктів було виділено міські очисні споруди, торгові центри, котельні, великі промислові підприємства;

– відмічено зміщення проявів острова тепла в передмісті, на південний схід в окремі періоди, що пов'язуємо з напрямком панівних вітрів у регіоні;

– моніторинг температури в листопаді – січні 2023–2024 рр. за допомогою 6 автоматичних датчиків, установлених у різних районах, показав наявність температурних відмінностей між центральними та приміськими районами Луцька в межах 1,5–2 °С (за осередненими показниками досліджуваного періоду);

3) для зниження негативних наслідків проявів міського острова тепла рекомендуємо методи горизонтального та вертикального озеленення, зокрема – запуск пілотних проєктів екодахів або зелених покрівель;

зелені теплозахисні бар'єри вздовж доріг і створення аераційних коридорів; використання в будівництві зовнішніх матеріалів із високою світловідбивною здатністю та заходи зі зменшення тепловтрат у комунальній і виробничій сферах.

Подяки

Автори висловлюють подяку своїм учням Анні Сергіївні Панькевич та Дмитру Олексійовичу Романюку, які долучалися до проведення інструментальних спостережень за температурою повітря в місті Луцьку.

Список використаної літератури

Адаптація до зміни клімату: зелені зони міст на варті прохолоди / Т.Т. Казанцев та ін. Київ : Зелена хвиля, 2016. 40 с.

Артамонов Б.Б. Аналіз впливу мікрокліматичних зон на процеси кліматоутворення у містах в умовах глобальної зміни клімату. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України*. 2013. № 23. С. 133–137.

Гречко А.А. Досвід та переваги застосування зелених дахів як елементу зеленої інфраструктури. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2022. № 26. С. 32–42. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-26-03>.

Зацерковний В.І., Оберемок Н.В., Березіна П.О. Просторово-часовий аналіз «островів тепла» мегаполіса за супутниковими знімками Landsat. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України*. 2018. № 1. С. 106–113. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.37.12377>.

Клімат Києва / за ред. В.І. Осадчого, О.О. Косовця, В.М. Бабіченко. Київ : Ніка-Центр, 2010. 320 с.

Кучерявий В.П., Геник Я.В., Кучерявий В.С., Шуплат Т.І., Гоцій Н.Д. Екопросторові та теплофізичні особливості формування «острова тепла» Львівського середмістя і життєвість деревних рослин. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України*. Львів, 2023. Вип. 33 (3). С. 23–33. <https://doi.org/10.36930/40330304>.

Лялько В.І., Крилова Г.Б., Філіпович В.Є. Вивчення розподілу поверхневих температур в історичній частині м. Києва. *Світ геотехніки*. 2016. № 2. С. 27–29.

Маринін І.А., Дранічер О.Р. Деякі оцінки характеристик острова тепла м. Одеса. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2013. № 12. С. 54–61.

Матвієнко М.О. Особливості міського острова тепла в Харкові. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2019. № 3. С. 131–133.

Метеопост – Архів погоди [Електронний ресурс]. URL: <https://meteopost.com/weather/archive/> (дата звернення: 10.01.2024).

Нетребчук І.М., Недбайло Д.Р., Лапюк С.В. Температурні аномалії влітку в місті Луцьку Волинської області. *Економіка міста та урбаністика : матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції*. Київ : КНЕУ, 2018. С. 162–167.

Нужина Н.В., Іванова І.Ю., Грицак А.Р., Дробик Н.М. Посухостійкі види дерев та кущів – важлива ланка для зменшення негативних ефектів «міських островів тепла». *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія «Біологія»*. 2022. Т. 82. № 3. С. 37–43. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.22.3.6>.

Романюк Д.О., Панькевич А.С., Федонюк В.В., Федонюк М.А. Геопросторова оцінка поля температури в Луцьку. *Contemporary challenges of society and ways to overcome them : The 4th International scientific and practical conference, January 30 – February 02, 2024. Tallinn, Estonia : International Science Group*, 2024. 297 p. Р. 68–71.

Свінціцька Г.І. Дослідження термічного режиму великого міста у світовій практиці. *Фізична географія та геоморфологія*. 2016. № 2. С. 96–99.

Стельмах В.Ю., Нетребчук І.М. Особливості формування «острова тепла» над містом Нововолинськом та шляхи оптимізації мікрокліматичних змін. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія «Географія»*. 2023. № 1. Вип. 54. С. 23–32. <https://doi.org/10.25128/2519-4577.23.1.3>.

Тарасюк Н.А., Тарасюк Ф.П. Регіональні прояви глобального потепління (за даними спостережень по метеостанції Луцьк). *Географія та екологія: наука і освіта* : матеріали V Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю, м. Умань, 10–11 квітня 2014 р. / відп. ред. О.В. Браславська. Умань : ВПЦ «Візаві» (видавець М.М. Сочінський), 2014. С. 330–333.

Федонюк М.А., Федонюк В.В. Проблеми теплового забруднення селітебних територій: дослідження та моніторинг. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2017. № 1 (15). С. 231–239 [Електронний ресурс]. URL: <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/5308> (дата звернення: 10.12.2024).

Шевченко О.Г., Сніжко С.І., Самчук Є.В. Температурні аномалії великого міста. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2011. Вип. 8. С. 67–73. [Електронний ресурс]. URL: <http://surl.li/rmegs> (дата звернення: 09.10.2024).

Шуплат Т.І. Особливості формування «острова тепла» львівського середмістя. *Охорона природи в контексті енергетичної та екологічної безпеки України* : збірник праць Перших зимових читань у Синьогорі / за ред. І.М. Данилика, Ю.С. Шпарика. 13–14 грудня 2022 р. Івано-Франківськ, 2022. С. 33–38.

Diem P.K., Nguyen C.T., Diem N.K., Diep N.T.H., Thao P.T.B., Hong T.G., Phan T.N. Remote sensing for urban heat island research: Progress, current issues, and perspectives. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2024. № 33. P. 101081. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101081>.

Qin Y., Ghalambaz S., Sheremet M., Baro M., Ghalambaz M. Deciphering urban heat island mitigation: a comprehensive analysis of application categories and research trends. *Sustainable Cities and Society*. 2024. V. 101. P. 105081. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105081>.

Sarah E.D., Martin R.A. Evolutionary Consequences of the Urban Heat Island. *Urban Evolutionary Biology*. 2020. 5. P. 91–110.

Tehrani A.A., Veisi O., Delavar Y., Bahrami S., Sobhaninia S., Mehan A. Predicting urban Heat Island in European cities: A comparative study of GRU, DNN, and ANN models using urban morphological variables. *Urban Climate*. 2024. № 56. P. 102061. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102061>.

Wu Q., Huang Y., Irga P., Kumar P., Li W., Wei W., ... Zhou J.L. Synergistic control of urban heat island and urban pollution island effects using green infrastructure. *Journal of Environmental Management*. 2024. № 370. P. 122985. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122985>.

References

Adaptatsiia do zminy klimatu: zeleni zony mist na varti prokholody. (2016) [Adapting to climate change: urban green spaces keep cool] / T.T. Kazantsev ta in. Kyiv : Zelena khvyliia, 40 p. [in Ukrainian].

Artamonov, B.B. (2013). Analiz vplyvu mikroklimatychnykh zon na protsesy klimatoutvorennia u mistakh v umovakh hlobalnoi zminy klimatu [Analysis of the influence of microclimatic zones on climate formation processes in cities under conditions of global climate change]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho lisotekhnichnoho universytetu Ukrainy [Scientific Bulletin of the National Forestry University of Ukraine]*, 23, 133–137 [in Ukrainian].

Hrechko, A.A. (2022). Dosvid ta perevahy zastosuvannia zelenykh dakhiv yak elementu zelesnoi infrastruktury [Experience and benefits of using green roofs as an element of green infrastructure]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V.N. Karazina. Seriiia "Ekolohiia" [Bulletin of the V.N. Karazin Kharkiv National University. Series "Ecology"]*, 26, 32–42. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-26-03> [in Ukrainian].

Zatserkovnyi, V.I., Oberemok, N.V., & Berezina, P.O. (2018). Prostorovo-chasovyi analiz "ostroviv tepla" mehapolisa za suputnykovymy znimkamy Landsat [Spatiotemporal analysis of megalopolis "Heat Islands" based on Landsat satellite images]. *Naukoiemni tekhnolohii [Science-intensive technologies]*, 1, 106–113. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.37.12377> [in Ukrainian].

Klimat Kyieva (2010). [Climate of Kyiv] / za red. V.I. Osadchoho, O.O. Kosovtsia, V.M. Babichenko. Kyiv : Nika-Tsentr. 320 p. [in Ukrainian].

Kucheriavyi, V.P., Henyk, Ya.V., Kucheriavyi, V.S., Shuplat, T.I., & Hotsii, N.D. (2023). Ekoprostorovi ta teplofizychni osoblyvosti formuvannia "ostrova tepla" Lvivskoho seredmistia i zhyttievist derevnykh roslyn [Ecospatial and thermophysical features of the formation of the "heat island" of Lviv city center and the vitality of woody plants]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho lisotekh-*

nichnoho universytetu Ukrainy [Scientific Bulletin of the National Forestry University of Ukraine], 33 (3), 23–33. <https://doi.org/10.36930/40330304> [in Ukrainian].

Lialko, V.I., Krylova, H.B., & Filipovych, V.Ie. (2016). Vyvchennia rozpodilu poverkhnevyykh temperatur v istorychnii chastyni m. Kyieva [Study of surface temperature distribution in the historical part of Kyiv]. *Svit geotekhniky [World of Geotechnics]*, 2, 27–29 [in Ukrainian].

Marynin, I.L., & Dranicher, O.R. (2013). Deiaki otsinky kharakterystyk ostrova tepla m. Odesa [Some assessments of the characteristics of the heat island of Odessa]. *Ukrainskyi hidrometeorologichnyi zhurnal [Ukrainian Hydrometeorological Journal]*, 12, 54–61 [in Ukrainian].

Matviienko, M.O. (2019). Osoblyvosti miskoho ostrova tepla v Kharkovi [Features of the urban heat island in Kharkiv]. *Hidrolohiia, hidrokhimiia i hidroekolohiia [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology]*, 3, 131–133 [in Ukrainian].

Meteopost – Arkhiv pohody [Meteopost – Weather archive]. [Electronic resource] URL: <https://meteopost.com/weather/archive/> (access date 10.01.2024) [in Ukrainian].

Netrobchuk, I.M., Nedbailo, D.R., & Lapiuk, S.V. (2018). Temperaturni anomalii vlitku v misti Lutsku Volynskoi oblasti [Temperature anomalies in summer in the city of Lutsk, Volyn region]. *Ekonomika mista ta urbanistyka [Urban economics and urban planning]*. Materialy Mizhnar. naukovo-prakt. internet-konf. Kyiv : KNEU, 162–167 [in Ukrainian].

Nuzhyna, N.V., Ivanova, I.Iu., Hrytsak, L.R., & Drobyk, N.M. (2022). Posukhostiiki vydy derev ta kushchiv – vazhlyva lanka dlia zmenshennia nehatyvnykh efektiv “miskykh ostroviv tepla” [Drought-resistant tree and shrub species are an important link in reducing the negative effects of “urban heat islands”]. *Naukovi zapysky TNPU imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii “Biologhiia” [Scientific notes of Volodymyr Hnatiuk TNPU. Series “Biology”]*, 82, 3, 37–43. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.22.3.6> [in Ukrainian].

Romaniuk, D.O., Pankevych, A.S., Fedoniuk, V.V., & Fedoniuk, M.A. (2024). Heoprostorova otsinka polia temperatury v Lutsku [Geospatial assessment of the temperature field in Lutsk]. *Contemporary challenges of society and ways to overcome them*. The 4th International scientific and practical conference, January 30 – February 02, 2024. Tallinn, Estonia, International Science Group, 68–71 [in Ukrainian].

Svintsitska, H.I. (2016). Doslidzhennia termichnoho rezhymu velykoho mista u svitovii praktytsi [Research on the thermal regime of a large city in world practice]. *Fizychna heohrafiia ta heomorfologhiia [Physical geography and geomorphology]*, 2, 96–99 [in Ukrainian].

Stelmakh, V.Iu., & Netrobchuk, I.M. (2023). Osoblyvosti formuvannia “ostrova tepla” nad mistom Novovolynsk ta shliakhy optymizatsii mikroklimatychnykh zmin [Features of the formation of a “heat island” over the city of Novovolynsk and ways to optimize microclimatic changes]. *Naukovi zapysky TNPU imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii “Heohrafiia” [Scientific notes of Volodymyr Hnatiuk TNPU. Series “Geography”]*, 1 (54), 23–32. <https://doi.org/10.25128/2519-4577.23.1.3> [in Ukrainian].

Tarasiuk, N.A., & Tarasiuk, F.P. (2014). Rehionalni proiavy hlobalnoho poteplinnia (za danymy sposterezhen po meteostantsii Lutsk) [Regional manifestations of global warming (according to observations at the Lutsk weather station)]. *Heohrafiia ta ekolohiia: nauka i osvita [Geography and Ecology: Science and Education]*: materialy V Vseukr. nauk.-prakt. konf. z mizhnar. uchastiu, m. Uman, 10–11 kvit. 2014 r. / vidp. red. O.V. Braslavsk. Uman: VPTs “Vizavi” (vydavets M.M. Sochinskyi), 330–333 [in Ukrainian].

Fedoniuk, M.A., & Fedoniuk, V.V. (2017). Problemy teplovoho zabrudnennia selitebnykh terytorii: doslidzhennia ta monitorynh [Problems of thermal pollution of residential areas: research and monitoring]. *Ekolohichna bezpeka ta zbalansovane resursokorystuvannia [Environmental safety and balanced resource use]*, 1 (15), 231–239. [Electronic resource] URL: <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/5308> (access date 10.12.2024) [in Ukrainian].

Shevchenko, O.H., Snizhko, S.I., & Samchuk, Ye.V. (2011). Temperaturni anomalii velykoho mista [Temperature anomalies of a large city]. *Ukrainskyi hidrometeorologichnyi zhurnal [Ukrainian Hydrometeorological Journal]*, 8, 67–73. [Electronic resource] URL: <http://surl.li/rmegs> (access date 09.10.2024) [in Ukrainian].

Shuplat, T.I. (2022). Osoblyvosti formuvannia “ostrova tepla” lvivskoho seredmistia [Features of the formation of the “heat island” of the Lviv city center]. *Okhorona pryrody v konteksti enerhetychnoi ta ekolohichnoi bezpeky Ukrainy [Nature protection in the context of energy and environmental security of Ukraine]*: Zbirnyk prats Pershykh Zymovykh chytan v Synohori / za red. I.M. Danylyka, Yu.S. Shparyka. 13–14 hrudnia 2022 r., Ivano-Frankivsk, 33–38 [in Ukrainian].

Diem, P.K., Nguyen, C.T., Diem, N.K., Diep, N.T.H., Thao, P.T.B., Hong, T.G., & Phan, T.N. (2024). Remote sensing for urban heat island research: Progress, current issues, and perspectives. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2024, 33, 101081. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101081> [in English].

Qin, Y., Ghalambaz, S., Sheremet, M., Baro, M., & Ghalambaz, M. (2024). Deciphering urban heat island mitigation: a comprehensive analysis of application categories and research trends. *Sustainable Cities and Society*, 101, 105081. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105081> [in English].

Sarah, E.D., & Martin, R.A. (2020). Evolutionary Consequences of the Urban Heat Island. In book: *Urban Evolutionary Biology*. May 2020, 91–110 [in English].

Tehrani, A.A., Veisi, O., Delavar, Y., Bahrami, S., Sobhaninia, S., & Mehan, A. (2024). Predicting urban Heat Island in European cities: A comparative study of GRU, DNN, and ANN models using urban morphological variables. *Urban Climate*, 56, 102061. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102061> [in English].

Wu, Q., Huang, Y., Irga, P., Kumar, P., Li, W., Wei, W., ... & Zhou, J.L. (2024). Synergistic control of urban heat island and urban pollution island effects using green infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 370, 122985. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122985> [in English].

Отримано: 25.02.2025

Прийнято: 15.05.2025



Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 12
Український журнал природничих наук
№ 12

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

ХІМІЯ

УДК 681.586

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.9>

РОЗРОБЛЕННЯ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОПТИЧНИХ СЕНСОРІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ОРГАНІЧНИХ АМІНІВ НА ЗАБРУДНЕНИХ ТЕРИТОРІЯХ

О. І. Аксіментьєва¹, Ю. Б. Марків², О. І. Конопельник³, Н. Ю. Журіна⁴

Хімічні та біологічні забруднювальні речовини здатні до газовиділення, тому детектування таких газів укр. необхідне для швидкого виявлення прихованих шкідливих речовин або їхніх компонентів. Органічні аміни становлять загрозу для людей і навколишнього середовища, тому створення спеціальних газових сенсорів є необхідним для швидкого виявлення цих речовин. Перспективними матеріалами таких сенсорів є електропровідні спряжені полімери, зокрема поліанілін та його похідні.

Вивчено особливості оптичного поглинання плівок поліаніліну під дією аміаку й органічних амінів. Для отримання зразків використовували метод хімічної полімеризації аніліну у водному розчині сульфатної кислоти під дією еквімолярної кількості персульфату амонію.

Проаналізовано ІЧ-спектри та спектри оптичного поглинання поліаніліну, встановлено основні характеристичні смуги для плівкового зразка. Плівки протестовано на чутливість до випарів аміаку, диетилентриаміну (ДЕТА) та поліетиленполіаміну (ПЕПА). За дії аміаку впродовж 1–3 хвилин в оптичних спектрах відбувається значний зсув смуги з максимумом за $\lambda = 820$ нм і формується нова смуга з максимумом за $\lambda = 590$ нм.

За дії парів ДЕТА та ПЕПА спостерігається зменшення оптичної густини смуги в діапазоні довжин хвиль 700–1 000 нм, а в області 500–650 нм зростає оптичне поглинання, що може бути пов'язане зі збільшенням концентрації аміно-хіноїдних фрагментів. Проте під дією ПЕПА зміна

¹ доктор хімічних наук, професор,
головний науковий співробітник кафедри фізичної та колоїдної хімії
(Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів)
e-mail: aksimen@ukr.net
ORCID: 0000-0003-3836-9607

² магістр, інженер кафедри фізичної та колоїдної хімії
(Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів)
e-mail: markivula@gmail.com
ORCID: 0009-0005-1618-5390

³ кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри загальної фізики
(Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів)
e-mail: konopel@ukr.net
ORCID: 0000-0003-4514-7340

⁴ студентка кафедри фізичної та колоїдної хімії
(Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів)
e-mail: natalyazh99@gmail.com
ORCID: 0009-0006-1722-0749

оптичної густини смуги за 820 нм виявляється більш помітно, ніж за дії ДЕТА, а також формується смуга з максимумом за 610 нм.

Встановлено, що чутливість плівки ПАН до дії газів є максимальною за довжини хвилі 600 нм. Швидкодія зразків за дії аміаку є найбільшою за $\lambda = 600$ нм, а за дії органічних амінів – за 820 нм. Отримані результати стануть основою для розроблення чутливих елементів оптичних сенсорів для виявлення токсичних амінів на забруднених територіях, у виробничих приміщеннях хімічних підприємств, складів тощо.

Ключові слова: оптичні спектри, поліанілін, аміак, диетиленetriамін, поліетиленполіамін.

DEVELOPMENT OF SENSITIVE ELEMENTS OF OPTICAL SENSORS FOR THE DETECTION OF ORGANIC AMINES IN CONTAMINATED AREAS

O. I. Aksimentyeva, Yu. B. Markiv, O. I. Konopelnyk, N. Yu. Zhurina

Chemical and biological pollutants are present in the presence of gases, so the detection of such gases is necessary for the rapid detection of the presence of pollutants or their components. Organic amines pose a threat to humans and the environment, so the creation of toxic gas sensors is necessary for the rapid detection of these substances. Promising materials for such sensors are conductive conjugated polymers, include polyaniline and their derivatives.

The features of the optical absorption of a polyaniline film under the action of ammonia and organic amines were studied. To obtain samples, the method of chemical polymerization of aniline in an aqueous solution of sulfuric acid under the action of an equimolar amount of ammonium persulfate was used.

The IR spectrum and optical absorption spectrum of polyaniline were analyzed, and the main characteristic bands of the obtained sample were established. The films were tested for ammonia, diethylenetriamine (DETA), and polyethylenepolyamine (PEPA) vapors. With exposure to ammonia, a significant shift of the band with a peak at $\lambda = 820$ nm occurs and a new band with a maximum at $\lambda = 590$ nm is formed.

Under the action of DETA and PEPA vapors, a decrease in the optical density of the band is observed in the wavelength range of 700–1 000 nm, and in the region of 500–650 nm, optical absorption increases, which may be associated with an increase in the concentration of amino-quinoid fragments. However, under the action of PEPA, the change in the optical density of the band at 820 nm is more noticeable than under DETA, and a band with a maximum at 610 nm is also formed.

It was established that the sensitivity of the PAn film to the action of gases is maximum at a wavelength of 600 nm. The reaction rate of samples on ammonia is the highest at $\lambda = 600$ nm, and under the action of organic amines – at 820 nm.

The results obtained will become the basis for the development of sensitive elements of optical sensors for the detection of toxic amines in contaminated areas, in production facilities of chemical enterprises, warehouses, etc.

Key words: optical sensor, polyaniline, ammonia, diethylenetriamine, polyethylenepolyamine.

Вступ

Органічні аміни широко використовують у промисловості як хімікати для нафтопродуктів, добавки для модифікації асфальту, епоксидні затверджувачі й інше (Hudson, 2021). Проте ці речовини є дуже токсичними та вибухонебезпечними; вдихання, проковтування або контакт шкіри з матеріалом можуть спричинити серйозні травми. В умовах воєнних дій і після їх завершення значна частина територій України залишилася забрудненою шкідливими речовинами – залишками отруйних речовин, токсичними включеннями, що утворюються у процесах розкладу хімічних і органічних (біологічних) матеріалів. Особливу небезпеку становлять продукти горіння цих речо-

вин, оскільки за нагрівання утворюються подразнюючі гази. Також стік від пожежогасіння може бути токсичним і спричиняти забруднення навколишнього середовища (National ..., 2025). Щоб захистити здоров'я людей і довкілля, необхідно розробити чутливі елементи оптичних сенсорів для моніторингу органічних амінів, що дозволить вчасно виявити ці речовини й уникнути займання.

Існує багато різних типів сенсорів, а саме – механічні, електромагнітні, теплові, оптичні, хімічні, електрохімічні тощо. Виходячи з огляду існуючих сенсорних матеріалів і пристроїв, найперспективнішими натеper вважаються напівпровідникові тонкоплівкові сенсори на основі

ZnO, SnO₂, TiO₂ та інших оксидів. Однак застосування оксидних матеріалів у сенсорах можливе тільки за високих робочих температур (473–1 073 K), що потребує спеціальних систем підігріву. Водночас поріг чутливості цих сенсорів не дозволяє визначати дуже малі концентрації газів, що виділяються з токсичних речовин у процесі їх зберігання та переробки (аміак, етанол, сірководень, кисень, оксиди нітрогену й інші). На відміну від оксидних сенсорів, органічні напівпровідникові елементи не потребують високих робочих температур, тому простіші за конструкцією, а плівки органічних напівпровідників і полімерів можуть бути сформовані з використанням значно простіших і недорогих методів. Проте систематичних досліджень можливості використання цих матеріалів для контролю газових середовищ для виявлення шкідливих речовин на забруднених територіях на тепер не проведено. Зокрема, мало даних про закономірності зміни структури, електропровідності й оптичних властивостей органічних напівпровідників під дією полярних газів, відсутні прості та надійні засоби візуального експрес-контролю свіжості продуктів харчування. Тому розроблення чутливих елементів газових сенсорів на основі органічних напівпровідників (молекулярних кристалів і спряжених полімерів) шляхом вивчення їхньої структури, електричних, оптичних властивостей у газових середовищах різного типу є важливим і актуальним науковим і практичним завданням.

На сучасному етапі дослідники в пошуках сенсорів із кращою чутливістю, вибірковістю та швидшим часом відгуку, які легше створювати, які більш портативні, з можливістю дистанційного керування та, в ідеалі, менш дорогі (Wang, 2010). У цьому аспекті оптичні сенсори мають кілька переваг, вони не потребують зовнішнього електричного сигналу, менш чутливі до електромагнітних перешкод, а їх відгук можна передавати на великі відстані за допомогою оптоволоконних систем. Основним елементом таких датчиків є чутливий матеріал, від якого залежить результат дослідження. Новітніми, перспективними сенсорними матеріалами вважаються електропровідні спряжені полімери, за відкриття яких у 2000 р. була присуджена Нобелівська премія з хімії (Heeger, 2001; MacDiarmid, 2001).

Електропровідні полімери – це новий клас речовин зі спряженою системою п-електронних зв'язків. Прості методи син-

тезу та легування дозволяють суттєво змінювати їхню провідність і ширину забороненої зони, яка для більшості полімерних напівпровідників лежить у межах 1,5–3,2 eV.

Дослідження в галузі електропровідних спряжених полімерів швидко розвиваються та демонструють великий потенціал у хімічних сенсорах газів за кімнатної температури (Tirfie et al., 2023). Загалом, електропровідні полімери з типовими п-спряженими структурами мають провідність *p*-типу. Під час взаємодії з молекулами газу вони поведуться або як донори, або як акцептори електронів, що може призвести до збільшення або зменшення концентрації носіїв. До спряжених полімерів, які досліджуються як чутливі матеріали, в основному належать поліанілін (далі – ПАН), поліпірол, полі(3,4-етилендіокситіофен) та їх похідні (Yan et al., 2020). У даній роботі досліджувалися сенсорні властивості плівок ПАН щодо дії органічних амінів, а саме диетилентриаміну (далі – ДЕТА) та поліетиленполіаміну (далі – ПЕПА).

Поліанілін є перспективним сенсорним матеріалом для виявлення аміаку (Farea et al., 2021), проте вплив на нього органічних амінів є не досить вивченим. Оскільки органічні аміни є похідними аміаку, то ми припускаємо, що їхня дія на полімер має схожі механізми взаємодії, що дозволяє розглядати ПАН як ефективний матеріал для виявлення аміновмісних речовин.

Методи отримання сенсорних плівок спряжених полімерів досить різноманітні та включають електрохімічну полімеризацію, вакуумне напилення, техніку Ленгмюра – Блоджет та інші (Tsizh & Aksimentyeva, 2020). Проте ці методи потребують складного апаратурного оформлення і в деяких випадках є енерговитратними. Значно спростити технологію отримання зразків дозволяє метод хімічного осадження, за якого сенсорна плівка формується безпосередньо на прозорому субстраті у процесі полімеризації *in situ* без дії зовнішніх чинників.

Метою роботи стало встановлення закономірностей оптичного поглинання тонких шарів ПАН, отриманих окисною полімеризацією на поверхні скла, під дією аміновмісних речовин – аміаку й органічних амінів.

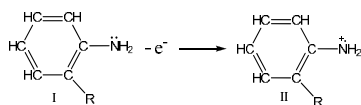
Матеріал і методи

Зразки ПАН отримували в тонкому шарі на оптично прозорих електропровідних субстратах за допомогою методу хімічної окисної полімеризації. Синтез ПАН в тонкому шарі проводили з 0,1 М розчину

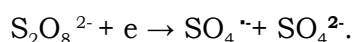
мономеру в 0,5 М сірчаній кислоті за температури $T = 293\text{ K}$. Як окисник використовували еквімолярний розчин персульфату амонію. Як субстрати використано скляні пластинки, вкриті з одного боку провідним шаром SnO_2 . Після нанесення плівок протягом 6–10 хвилин зразки промивали дистильованою водою та сушили у вакуумній шафі до постійної маси за температури 360–380 K. Отримували рівномірні покриття зеленого кольору з міцною адгезією до поверхні електрода (рис. 1-а).

У процесі формування сенсорних плівок методом хімічного осадження ПАН із розчинів мономеру у протонних кислотах відбувається низка фізико-хімічних процесів, пов'язаних із перенесенням електрона на межі електрод – розчин, окисненням мономеру з формуванням катіон-радикалів аніліну, хіноїдна ізомеризація і окисне сполучення яких приводять до утворення спряжених полімерних ланцюгів і формування електропровідного полімерного шару (Аксиментьева, 1998).

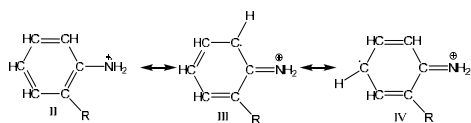
На першому етапі відбувається окиснення мономеру з відривом одного електрона (схема). Процес ініціюється реакцією окиснення мономеру до катіон-радикала:



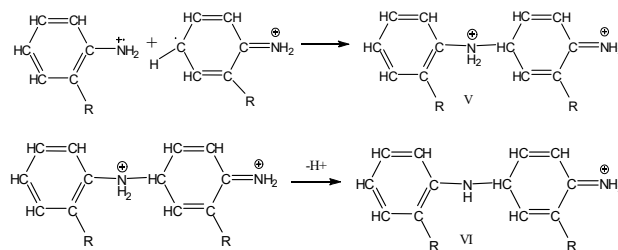
Окисник – $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ водночас відновлюється до аніон-радикала $\text{SO}_4^{\cdot-}$:



Згідно з наявними теоріями, катіон-радикали ізомеризуються і перебувають у формі резонансних структур II–IV:



Найбільш стабільною є структура IV, особливо за наявності електрон-донорного замісника (R).



Оскільки катіон-радикал існує переважно як структура IV, то полімеризація відбувається здебільшого в парах – положення і приєднання (окисне сполучення) вихідного й ізомеризованого катіон-радикалів відбувається за принципом «голова – хвіст», що призводить до утворення димеру, супроводжується депротонуванням. Надалі відбуваються послідовні процеси окиснення димеру й окисного сполучення з мономером, що зумовлюють ріст полімерного ланцюга.

Процес окиснення аніліну в розчині кислоти починається після індукційного періоду, який залежить від температури й концентрації мономеру, супроводжується зміною кольору реакційної суміші, яка з безбарвної стає світло-синьою, а потім – темно-синьою, за тривалого часу полімеризації – темно-зеленою або чорною.

Утворення полімеру є бімолекулярною реакцією, ускладненою гетерогенними умовами росту ланцюга, коли продукт реакції, утворений у приелектродному шарі, не розчиняється в реакційному середовищі й утворює плівку на поверхні електрода. Утворений полімерний шар має яскраво-зелене забарвлення, властиве кислотно-легованій формі ПАН – солі емеральдину (див. рис. 1-а).

Для вивчення сенсорних властивостей отриманої плівки як аналіти досліджували випари амінів: аміаку, ДЕТА та ПЕПА.

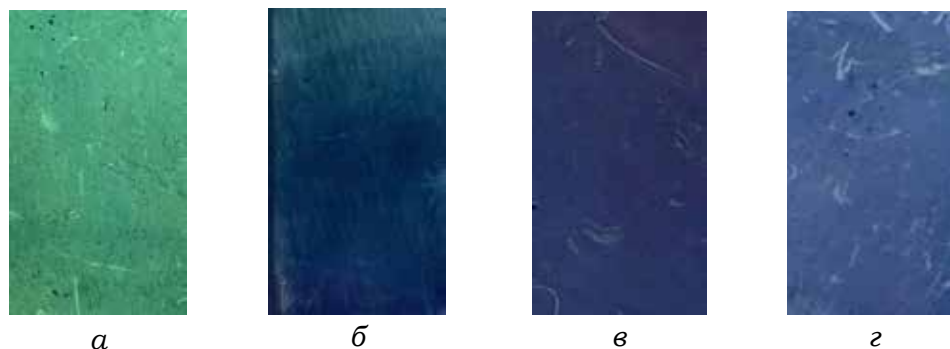


Рис. 1. Світлини поверхні плівки: а – ПАН; б – ПАН під дією NH_3 ; в – ПАН під дією ДЕТА; з – ПАН під дією ПЕПА (збільшення 150)

Структурні формули речовин наведені на рис. 2.

За допомогою ІЧ-спектроскопії ідентифікували отримані плівки Пан за допомогою Thermo Scientific Nicolet iZ10 Smart ITR. Спектри отримували в інтервалі хвильових чисел 400–4 000 cm^{-1} за температури 293 К.

Для тестування сенсорних властивостей поліаніліну отримані зразки поміщали в кюветне відділення спектрофотометра inSpect-105UV і визначали значення оптичної густини (D_0) в інтервалі 400–1100 нм за температури 293 К. Як еталон застосовували

чисту скляну пластинку із шаром SnO_2 . Після цього плівки витримували в камері з парами органічних амінів (концентрація пари становила 0,25 mg/cm^3) упродовж 1–10 хвилин до встановлення стаціонарного значення оптичної густини (D) і знімали спектр у тому ж спектральному діапазоні.

Результати

Синтезовані методом хімічного осадження плівки ПАН ідентифіковані методом ІЧ-спектроскопії (рис. 3). На отриманому ІЧ-спектрі простежуються піки, які є харак-

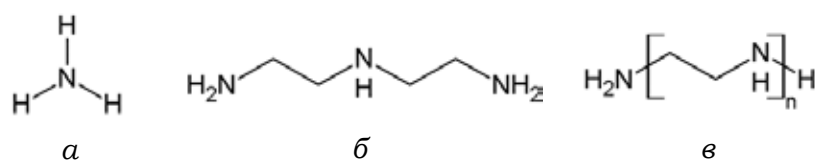


Рис. 2. Структурні формули: а – аміак; б – ДЕТА; в – ПЕПА

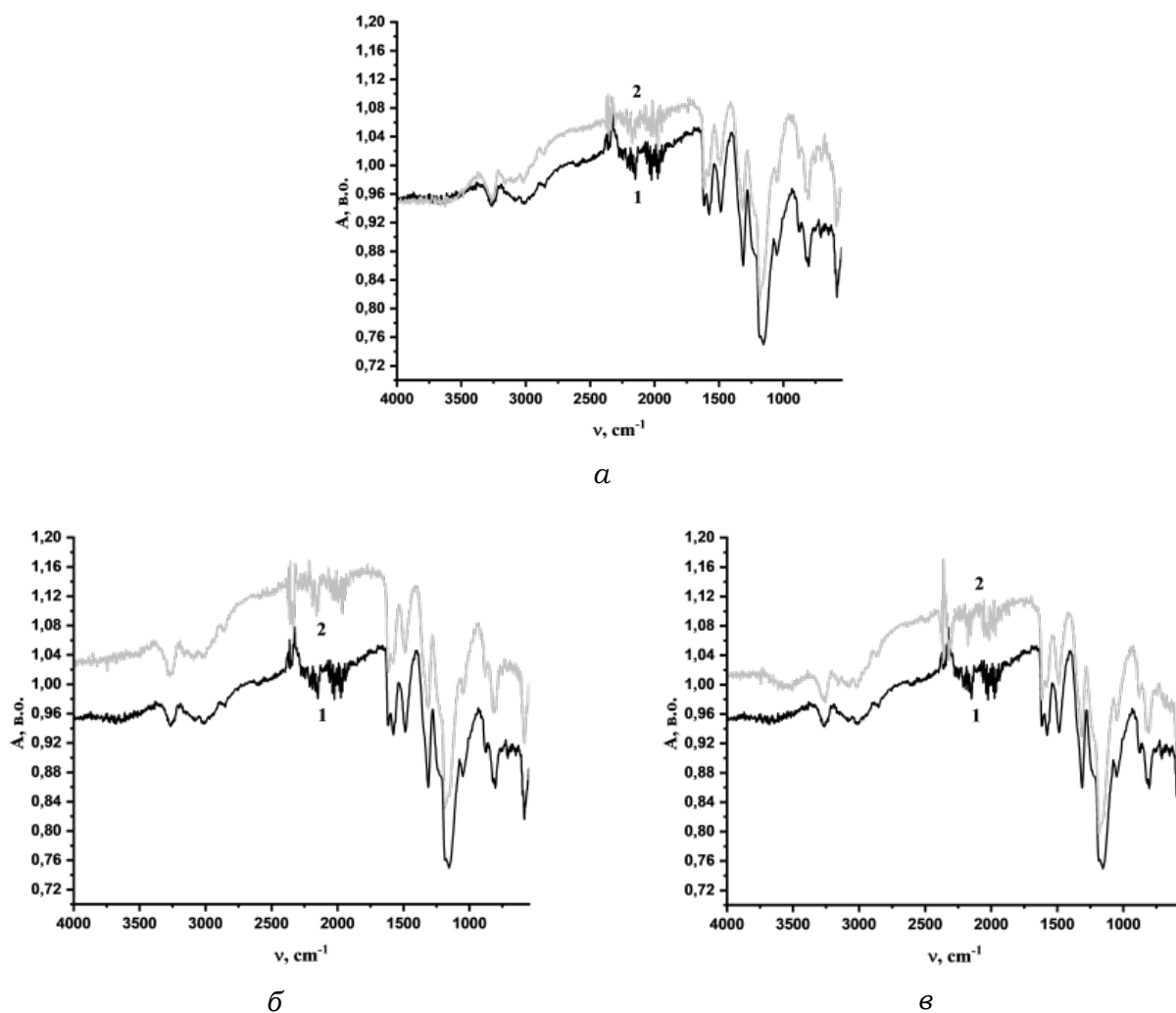


Рис. 3. ІЧ-спектри ПАН (1) під дією: а – NH_3 (2); б – ДЕТА (2); в – ПЕПА (2)

терними для ПАН, одержаного іншими методами синтезу (Rahman et al., 2022). Отриманий полімер має характеристичні смуги в області 3 500–3 100 см^{-1} , які при-
таманні валентним коливанням груп – NH і NH_2 . Характерні піки валентних коливань C = N і C = N хіноїдних і бензоїдних кілець на 1 539 та 1 406 см^{-1} відповідно. Пік за 1 278 см^{-1} – асиметричні деформаційні C – N вторинного ароматичного аміну. Смуга на 1 075 см^{-1} належить ароматичним C – N площинним коливанням хіноїдного кільця. 933 см^{-1} – ароматичні C – N позаплощинні коливання бензоїдного кільця.

Для дослідження сенсорних властивостей плівок поліаніліну, які нанесено на підкладку, покриту станумом оксидом, спочатку виміряно густину оптичного поглинання отриманих зразків у діапазоні 400–1 000 нм за наявності випарів речовин

амінного типу (рис. 4). Як модельний об'єкт вибрано молекулу аміаку без органічних функціональних груп. Спектри оптичного поглинання під дією аміаку наведені на рис. 4-а, криві 2, 3.

Чутливість плівок ПАН до дії аміновмісних речовин визначено як відносну зміну оптичної густини $|D - D_0|/D_0$ на зазначеній довжині хвилі, а швидкодію як $|\Delta D|/\tau$, де τ – час витримки (табл. 1).

Отримані результати показують, що за довжини хвилі 600 нм чутливість плівки ПАН є максимальною для всіх досліджуваних газів. Проте реакція зразків на аміак і ПЕПА є більш помітною, ніж на ДЕТА. За довжини хвилі 600 нм значення сенсорної чутливості більше майже втричі, а за 820 нм – удвічі. Швидкодія плівок ПАН є найбільшою під впливом аміаку за довжини хвилі 600 нм, а під дією органічних амінів – за 820 нм.

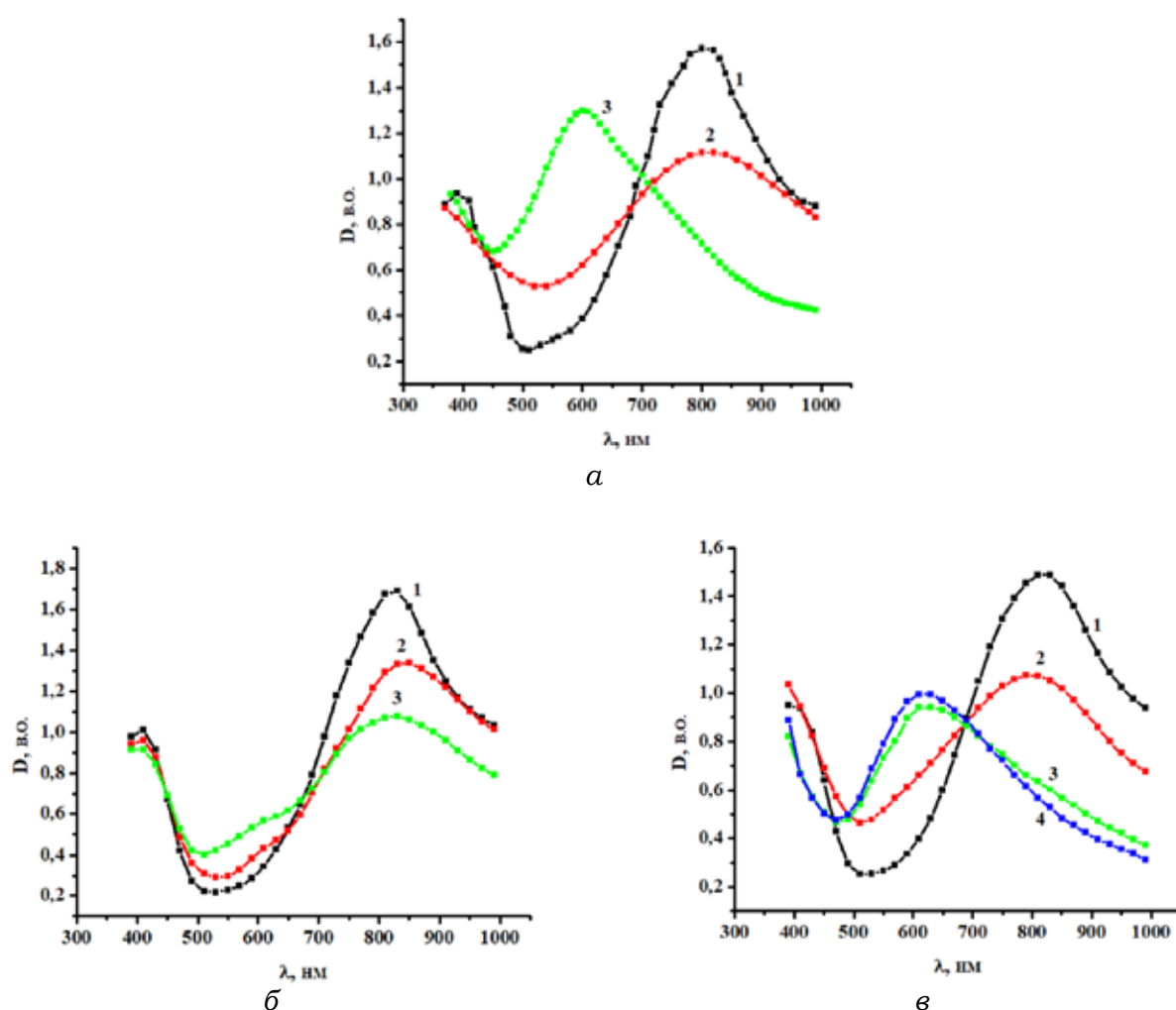


Рис. 4. Спектри поглинання ПАН (1) під дією а – аміаку: 2–3 хв; 3–6 хв; б – ДЕТА: 2–6 хв; 3–9 хв; в – ПЕПА: 2–3 хв; 3–6 хв; 4–10 хв

Таблиця 1

Чутливість і швидкодія плівок ПАН до дії аміновмісних речовин

Довжина хвилі, нм	Чутливість, %			Швидкодія, 10^{-3} , с $^{-1}$		
	NH ₃	ДЕТА	ПЕПА	NH ₃	ДЕТА	ПЕПА
600	225	71,4	233	2,5	0,5	1,2
820	56,7	35,3	60	2,4	1,1	1,5

Обговорення

Отримані результати свідчать про високу чутливість поліаніліну, отриманого хімічним осадженням, до дії аміаку й органічних амінів. ІЧ-спектри зразків під дією аміновмісних речовин показують збільшення інтенсивності поглинання смуги в діапазоні 3 500–3 100 см $^{-1}$, що свідчить про збільшення вмісту аміновмісних фрагментів у плівці ПАН. Водночас смуги, які відповідають бензо-хіноїдним фрагментам, мають більшу інтенсивність за 1 539 та 1 406 см $^{-1}$. Можна припустити, що це пов'язано із частковою нейтралізацією емеральдинової сольової форми поліаніліну та збільшенням вмісту його непровідної основної форми.

Згідно з даними оптичної спектроскопії у ближній УФ, видимій і ближній ІЧ області, спектри плівки ПАН в діапазоні 400–1 000 нм характеризуються наявністю двох смуг (див. рис. 4-а, крива 1), що характерно для даного полімеру (Tsizh et al., 2020). Максимум першої смуги спостерігається за 400 нм та відповідає π - π^* -переходу у спряженій системі полімеру. Друга смуга перебуває в діапазоні 700–900 нм, її пік розташований за λ = 820 нм. Ця смуга відповідає поглинанню носіїв заряду поляронного типу (іміно-хіноїдні катіон-радикали), що підтверджує утворення провідної напівокисненої форми ПАН, а саме – емеральдинової солі з яскраво зеленим забарвленням (див. рис. 1-а).

Встановлено, що під дією аміаку відбуваються суттєві зміни у спектрах оптичного поглинання ПАН. У початковий період дії аміаку від 30 до 180 с відбувається зменшення оптичної густини смуги за 820 нм (див. рис. 4-а, крива 2). Імовірно, спостережені зміни пов'язані зі зменшенням концентрації носіїв заряду поляронного типу внаслідок часткової нейтралізації протонованої форми ПАН (Ціж та ін., 2016). За більш тривалого часу дії газу відбувається значний зсув цієї смуги майже на 200 нм, формується нова смуга з максимумом за 590 нм, яка притаманна аміно-хіноїдним структурам нейтралізованої форми полімеру. Колір плівки змінюється з яскраво-зеленого,

характерного для емеральдинової солі ПАН, на темно-синій, властивий емеральдиновій основі (рис. 1-б).

Під час дії органічних амінів характер зміни оптичного поглинання має свої особливості (рис. 4-б). У результаті дії парів ДЕТА протягом 6 і 9 хвилин спостерігаємо зменшення оптичної густини смуги за 820 нм, тоді як в області від 500 до 650 нм зростає оптичне поглинання, що може бути пов'язане зі збільшенням концентрації аміно-хіноїдних фрагментів. Водночас швидкість таких змін невисока внаслідок меншої активності аміногрупи, зв'язаної з вуглеводневим ланцюгом ДЕТА (рис. 2-б).

На відміну від ДЕТА під дією ПЕПА зміна оптичної густини та зміщення максимуму смуги поглинання за 820 нм виявляється більш помітно (рис. 4-в). Значення ΔD становить 0,5 за часу витримки 3 хвилини для ПЕПА, а для ДЕТА – 0,2 за 6 хвилин. Збільшення часу витримки приводить до зсуву довгохвильової смуги та формуванню смуги з максимумом за 610 нм (див. рис. 4-в, криві 3, 4). У діапазоні довжин хвиль 700–1 000 нм спостерігається зменшення оптичної густини, проте в області 500–700 нм оптичне поглинання збільшується. Такі ж зміни у спектрі поглинання плівки ПАН спостерігалися під дією аміаку. Стаціонарне значення оптичної густини досягається в результаті дії ПЕПА протягом 6 хвилин (див. рис. 4-в, криві 3, 4).

Особливості поведінки оптичних спектрів ПАН під дією ДЕТА і ПЕПА зумовлюються як хімічною будовою цих речовин, так і здатністю до адсорбції на поверхні плівки. Цим чинником також зумовлена різна сенсорна чутливість до органічних амінів і швидкодія сенсора.

Висновки

1. Встановлено закономірності зміни оптичного поглинання плівок поліаніліну, отриманих методом хімічної полімеризації, за дії аміновмісних речовин.

2. Досліджено ІЧ-спектри та спектри оптичного поглинання ПАН під дією аміаку, диетилентриаміну та поліетиленполіаміну. Показано, що досліджувані гази збільшують

інтенсивність поглинання піків, які відповідають аміновмісним і бензо-хіноїдним фрагментам.

3. Чутливість плівки ПАН до дії аміновмісних сполук залежить від їхньої молекулярної структури й може бути розташована в ряду ДЕТА < NH₃ < ПЕПА. За 600 нм значення чутливості до аміаку майже втричі більше, а за 820 нм – удвічі, ніж на ДЕТА. Швидкодія зразка є найбільшою під впливом аміаку за довжини хвилі 600 нм, а під дією органічних амінів – за 820 нм.

4. Отримані результати стануть основою для розроблення чутливих елементів оптич-

них сенсорів для виявлення токсичних амінів на забруднених територіях, у виробничих приміщеннях хімічних підприємств, складів тощо.

Подяки

Дослідження, викладені у статті, виконані за ґрантового фінансування Національного фонду досліджень України в рамках конкурсу «Наука для зміцнення обороноздатності України» у рамках проєкту 2023.04/0133 (Державний реєстраційний номер: 0124U003799) «Розробка детекторів для експрес-контролю токсичних речовин на забруднених територіях» (2024–2025 pp.).

Список використаної літератури

Аксиментьєва О.І. Електрохімічні методи синтезу і провідність спряжених полімерів. Львів : Світ, 1998. 154 с.

Ціж Б.Р., Аксиментьєва О.І., Ольхова М.Р., Горбенко Ю.Ю. Сенсорні властивості плівок поліаніліну, отриманих на оптично прозорих носіях. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького*. 2016. Т. 18. № 2 (68). С. 121–125. <https://doi.org/10.15421/nvlvet6824>.

Farea M.A., Mohammed H.Y., Shirsat S.M., Sayyad P.W., Ingle N.N., Al-Gahouari T., Mahadik M.M., Bodkhe G.A., Shirsat M.D. Hazardous gases sensors based on conducting polymer composites : Review. *Chemical Physics Letters*. 2021. Vol. 776. P. 138703. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.138703>.

Hudson N.L. Diethylenetriamine (DETA). *Skin notation profile*. 2021. № 102. <https://doi.org/10.26616/NIOSH PUB2021102>.

Heeger A.J. Semiconducting and metallic polymers: the fourth generation of polymeric materials. *Synth. Met.* 2001. Vol. 125. P. 23–42. <https://doi.org/10.1021/jp011611w>.

MacDiarmid A. “Synthetic metals”: a novel role for organic polymers. *Curr. Appl. Phys.* 2001. Vol. 1. P. 269–79. [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20010716\)40:14<2581](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20010716)40:14<2581).

National Center for Biotechnology Information. [Electronic resource]. URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Diethylenetriamine#section=Health-Hazards> (дата звернення: 16.01.2025).

Rahman M.M.K., Islam M., Amin K., Paul S.K., Rahman S., Talukder Md.M., Rahman Md.M. Simplistic fabrication of aniline and pyrrole-based poly(Ani-co-Py) for efficient photocatalytic performance and supercapacitors. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47. P. 37860–37869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.296>.

Tirfie L.A., Tegegne N., Gashaw F. Recent progress in hybrid conducting polymers and metal oxide nanocomposite for room-temperature gas sensor applications : A review. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2023. Vol. 359. P. 114472. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114472>.

Tsizh B.R., Aksimentyeva O.I. Ways to improve the parameters of optical gas sensors of ammonia based on polyaniline. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2020. Vol. 315. P. 112273. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112273>.

Wang H.H. Flexible Chemical Sensors. *Semiconductor Nanomaterials for Flexible Technologies*. 2010. Chapter 9. P. 247–273. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-7823-6.00009-X>.

Yan Y., Yang G., Xu J.L., Zhang M., Kuo C.C., Wang S.D. Conducting polymer-inorganic nanocomposite-based gas sensors: a review. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2020. Vol. 21 (1). P. 768–786. <https://doi.org/10.1080/14686996.2020.1820845>.

References

Aksimentyeva, O.I. (1998) Elektrokhimichni metody syntezy i providnist spryazhenykh polimeriv [Electrochemical synthesis methods and conductivity of conjugated polymers]. Lviv : Svit [Lviv: World]. 154 p. [in Ukrainian].

Tsizh, B.R., Aksimentyeva, O.I., Olhova, M.R., & Horbenko, Yu.Yu. (2016). Sensorni vlastyvo-
sti plivok polianilinu, otrymanykh na optychno prozorykh nosiyakh [Sensory properties of poly-

aniline films obtained on optically transparent media]. *Naukovyi visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu veterinarynoi medytsyny ta biotekhnolohii imeni S.Z. Gzhyts'koho* [Scientific Bulletin of the S.Z. Gzhytsky Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnology], 18, 2 (68), 121–125. <https://doi.org/10.15421/nvlvet6824> [in Ukrainian].

Farea, M.A., Mohammed, H.Y., Shirsat, S.M., Sayyad, P.W., Ingle, N.N., Al-Gahouari, T., Mahadik, M.M., Bodkhe, G.A., & Shirsat, M.D. (2021). Hazardous gases sensors based on conducting polymer composites: Review. *Chemical Physics Letters*, 776, 138703. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.138703> [in English].

Hudson, N.L. (2021). Diethylenetriamine (DETA). *Skin notation profile*, 102. <https://doi.org/10.26616/NIOSHPUB2021102> [in English].

Heeger, A.J. (2001). Semiconducting and metallic polymers: the fourth generation of polymeric materials. *Synth. Met.*, 125, 23–42. <https://doi.org/10.1021/jp011611w> [in English].

National Center for Biotechnology Information. [Electronic resource] URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Diethylenetriamine#section=Health-Hazards> (access date 16.01.2025) [in English].

MacDiarmid, A. (2001). “Synthetic metals”: a novel role for organic polymers. *Curr. Appl. Phys.*, 1, 269–279. [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20010716\)40:14<2581](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20010716)40:14<2581) [in English].

Rahman, M.M.K., Islam, M., Amin, K., Paul, S.K., Rahman, S., Talukder, Md.M., & Rahman, Md.M. (2022). Simplistic fabrication of aniline and pyrrole-based poly(Ani-co-Py) for efficient photocatalytic performance and supercapacitors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 37860–37869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.296> [in English].

Tirfie, L.A., Tegegne, N., & Gashaw, F. (2023). Recent progress in hybrid conducting polymers and metal oxide nanocomposite for room-temperature gas sensor applications: A review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 359, 114472. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114472> [in English].

Tsizh, B.R., & Aksimentyeva, O.I. (2020). Ways to improve the parameters of optical gas sensors of ammonia based on polyaniline. *Sensors and Actuators A: Physical*, 315, 112273. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112273> [in English].

Wang, H.H. (2010). Flexible Chemical Sensors. *Semiconductor Nanomaterials for Flexible Technologies*, Chapter 9, 247–273. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-7823-6.00009-X> [in English].

Yan, Y., Yang, G., Xu, J.L., Zhang, M., Kuo, C.C., & Wang, S.D. (2020). Conducting polymer-in-organic nanocomposite-based gas sensors: a review. *Science and Technology of Advanced Materials*, 21 (1), 768–786. <https://doi.org/10.1080/14686996.2020.1820845> [in English].

Отримано: 25.04.2025

Прийнято: 15.05.2025



Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 12
Український журнал природничих наук
№ 12

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

УДК 666.76, 661.174

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.10>

ДОСЛІДЖЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ІНТУМЕСЦЕНТНИХ РУЛОННИХ ПОКРИТТІВ

**Р. А. Вахітов¹, В. І. Шологон², Н. А. Таран³, К. В. Калафат⁴, В. І. Бессарабов⁵,
Л. М. Вахітова⁶**

Забезпечення надійного та швидкого вогнезахисту будівельних конструкцій, інфраструктурних та оборонних об'єктів потребує застосування ефективних, технологічних мобільних засобів. Особливу актуальність набувають інтумесцентні рулонні покриття, здатні забезпечувати конструктивний і реактивний вогнезахист завдяки взаємодії волокнистих основ і спеціальних вогнезахисних композицій. Ці покриття відрізняються гнучкістю, легкістю нанесення та можливістю адаптації до різних умов експлуатації. Мета роботи – дослідження впливу графітових

¹ аспірант кафедри хімічної технології та ресурсозбереження
(Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ)
vahitov89@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9657-5743

² кандидат хімічних наук, науковий співробітник відділу досліджень нуклеофільних реакцій
(Інститут фізико-органічної хімії та вуглехімії імені А. М. Литвиненка НАНУ, м. Київ)
e-mail: Shologon@nas.gov.ua
ORCID: 0000-0002-6249-5390

³ кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник,
старший науковий співробітник відділу досліджень нуклеофільних реакцій
(Інститут фізико-органічної хімії та вуглехімії імені А. М. Литвиненка НАНУ, м. Київ)
e-mail: nadegda5.09.2017@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1043-5596

⁴ доктор філософії з хімічної технології та інженерії, старший науковий співробітник відділу
досліджень нуклеофільних реакцій
(Інститут фізико-органічної хімії та вуглехімії імені А. М. Литвиненка НАНУ, м. Київ)
e-mail: kalafat@nas.gov.ua
ORCID: 0000-0001-6165-0005

⁵ доктор технічних наук, професор, професор кафедри промислової фармації
(Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ)
e-mail: v.bessarabov@kyivpharma.eu
ORCID: 0000-0003-0637-1729

⁶ кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник відділу досліджень нуклеофільних реакцій
(Інститут фізико-органічної хімії та вуглехімії імені А. М. Литвиненка НАНУ, м. Київ)
e-mail: L.M.Vakhitova@nas.gov.ua
ORCID: 0000-0003-1923-7895

наповнювачів на вогнезахисну ефективність рулонних інтумесцентних вогнезахисних матеріалів на основі різних типів неорганічних підкладок (скловолокно, мінераловолокно, керамоволокно). Методами експерименту є приготування композицій на основі системи амоній поліфосфат (APP) / меламін (MA) / пентаеритрит (PE) з варіативним додаванням терморозширюваного (EG) та спученого графіту (SG), формування рулонних покриттів, вогневі випробування за методом «пальника Бунзена». Доведено необхідність комбінування графітових наповнювачів з інтумесцентною системою для досягнення високих вогнезахисних характеристик рулонних реактивних покриттів. За результатами дослідження встановлено, що найбільш ефективні композиції містять EG до 5%, SG – не більше ніж 1%, а також містять сітку зі скловолокна як армувальний елемент. Такі покриття забезпечують стабільне інтенсивне спучення, утворення однорідного коксового шару й ефективну теплоізоляцію. Наукова новизна полягає в комплексному аналізі впливу рецептурних параметрів на термоізоляційні властивості покриттів, що дає змогу цілеспрямовано підходити до дизайну складу інтумесцентного покриття із заданими показниками вогнестійкості. Практична значущість дослідження пов'язана з можливістю впровадження розроблених рулонних засобів мобільного вогнезахисту, виробництво яких відсутнє в Україні.

Ключові слова: вогнезахист, інтумесцентне покриття, терморозширюваний графіт, спучений графіт, пінококс, рулонний вогнезахисний матеріал.

STUDY OF FIRE PROTECTION PROPERTIES OF INTUMESCENT ROLL COATINGS

R. A. Vakhitov, V. I. Shologon, N. A. Taran, K. V. Kalafat, V. I. Bessarabov,
L. M. Vakhitova

Ensuring effective and rapid fire protection of building structures, infrastructure and defence facilities requires the use of efficient, technologically advanced mobile means. Intumescent roll coatings are of particular relevance, as they are capable of providing constructive and reactive fire protection through the interaction of fibre substrate and special compositions. These coatings are flexible, easy to apply and adaptable to different operating conditions. The purpose of the study is to investigate the effect of graphite fillers on the fire protection efficiency of roll intumescent fire protection materials based on different types of inorganic substrates (glass fibre, mineral fibre, ceramic fibre). The methods of the experiment were the preparation of compositions based on the ammonium polyphosphate (APP)/melamine (MA)/pentaerythritol (PE) system with the variable addition of expandable (EG) and swollen graphite (SG), the formation of roll coatings, and fire tests using the Bunsen burner method. The necessity of combining graphite fillers with an intumescent system to achieve effective fire protection characteristics of reactive roll coatings has been proved. The study found that the most effective compositions contain EG – no more than 5%, SG – no more than 1%, and also include a glass fibre mesh as a reinforcing element. Such coatings provide stable intensive swelling, formation of a homogeneous char layer and effective thermal insulation. The scientific novelty lies in the comprehensive analysis of the influence of formulation parameters on the thermal insulation properties of coatings, which allows for a targeted approach to the design of the composition of the intumescent coating with specified fire resistance indicators. The practical significance of the study is based on the possibility of implementing the developed roll of mobile fire protection products, the production of which is not available in Ukraine.

Key words: fire protection, intumescent coating, expandable graphite, swollen graphite, foam char, roll materials.

Вступ

Забезпечення вогнезахисту будівельних конструкцій є обов'язковою умовою сучасного будівництва, спрямованого на підвищення вогнестійкості об'єктів застосування засобів вогнезахисту: тонкошарових покриттів інтумесцентного (реактивного) типу, вогнезахисних штукатурок, плит, гнучких рулонних матеріалів тощо (Wang & Le 2023; Gernay, 2024; Gravit et al., 2024a). Останнім часом особливої уваги набули інтумесцентні рулонні матеріали, що поєднують

властивості конструктивного й реактивного вогнезахисту, завдяки використанню негорючих волокнистих основ (підкладок), на які нанесено вогнезахисні покриття (Steau, 2020; Brent & T'ien, 2022; Shiu et al., 2023).

У науковій літературі значну увагу приділено класичним системам інтумесцентного вогнезахисту (intumescent flame retardant, IFR) на основі тріади амоній поліфосфат (APP) / меламін (MA) / пентаеритрит (PE) (Yasir, 2019; Vakhitova, 2024). Ці композиції інтенсивно вивчаються в поєднанні з різ-

ними полімерними матрицями та наповнювачами. Зокрема, повідомляється про можливість покращення ефективності таких систем шляхом введення наповнювачів, що є термостійкими або каталізують утворення коксового шару (Yasir, 2019). Графітові модифікатори, зокрема терморозширюваний графіт (EG) та спучений графіт (SG), демонструють потенціал як у підвищенні коефіцієнта спучення, так і у зменшенні втрат маси покриттів (Zheng et al., 2016; Kmeťová et al., 2024). Водночас залишаються суперечливими дані щодо механізму їхньої дії в системах інтумесцентного типу, зокрема щодо доцільності використання EG, а також щодо взаємодії графітових наповнювачів з різними типами підкладок. Незважаючи на наявні публікації щодо впливу окремих компонентів інтумесцентних покриттів (Zheng et al., 2016; Nolan, 2019), недостатньо досліджено ефекти комплексної дії графітових наповнювачів у рулонних інтумесцентних системах. Залишається відкритим питання впливу співвідношення EG та SG на ефективність спучення вогнезахисного покриття з використанням різних типів неорганічних підкладок. Не визначено також оптимальну концентрацію цих наповнювачів для досягнення балансу між механічною стабільністю пінококсу та його теплоізоляційними властивостями (Zheng et al., 2016; Ma et al., 2024; Kmeťová et al., 2024).

Волокнисті основи у складі рулонних інтумесцентних покриттів виконують не лише механічну функцію (підкладку для нанесення композиції), але й беруть участь у формуванні структури теплоізоляційного шару шляхом модифікації механізму спучення інтумесцентної системи. Крім того, неорганічна підкладка здатна підвищувати термостійкість та адгезійні властивості пінококсу, що утворюється внаслідок дії високої температури (Otáhal et al., 2011; Amir et al., 2011; Amir et al., 2013).

Таким чином, обґрунтований вибір типу неорганічної підкладки дозволить оптимізувати характеристики інтумесцентного рулонного покриття, забезпечуючи необхідну механічну підтримку утвореного коксового шару без негативного впливу на процеси генерації піни.

Слід констатувати, що наукові дослідження, присвячені вогнезахисним властивостям рулонних матеріалів, є обмеженими та фрагментарними. Наявні роботи переважно стосуються характеристик него-

рючих волокон, механізмів спучення інтумесцентних покриттів та загальної оцінки ефективності конструктивного вогнезахисту. Публікації з питань створення комбінованих інтумесцентних рулонних систем, що поєднують волокнисті підкладки з інтумесцентними композиціями, є поодинокими (Triantafyllidis & Bisby, 2020; Takahashi, 2021). При цьому недостатньо вивчені питання впливу типу неорганічної підкладки на формування термостійкого пінококсу, міцність та адгезію захисного шару інтумесцентних покриттів. Необхідні також додаткові дослідження для обґрунтування вибору оптимальних поєднань композиційних матеріалів з метою підвищення ефективності та технологічності гнучких вогнезахисних систем (Nolan, 2019).

У контексті військових дій, що тривають в Україні, проблема оперативного забезпечення мобільного вогнезахисту об'єктів оборонного призначення набуває критичної важливості. Використання легких гнучких вогнезахисних матеріалів дає змогу ефективно організувати захист укриттів, складів зброї, паливо-мастильних матеріалів та інших стратегічних об'єктів у складних кліматичних та експлуатаційних умовах (Chin et al., 2000; Tewarson et al., 2001). Крім того, рулонні вогнезахисні покриття можуть застосовуватися для підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій та комунікацій у разі оперативного відновлення зруйнованих об'єктів інфраструктури, електроенергетики, газо- та нафтопереробних підприємств (Gravit et al., 2024b).

Попри очевидні переваги гнучких вогнезахисних матеріалів, в Україні відсутнє власне виробництво таких засобів вогнезахисту. Тож необхідність розробки рулонних вогнезахисних матеріалів є надзвичайно актуальною як для будівельної галузі, так і для потреб оборонного комплексу.

Метою цієї роботи є дослідження впливу графітових наповнювачів на вогнезахисну ефективність рулонних інтумесцентних вогнезахисних матеріалів на основі різних типів неорганічних підкладок (скловолокно, мінераловолокно, керамоволокно).

Матеріал і методи

Матеріали. Для приготування інтумесцентних композицій (IFR) використовували поліфосфат амонію FR Cros 484 (Budenheim, Іспанія), пентаеритрит марки Charmor PM40 (Perstorp Holding AB, Швеція), меламін мікронізований (Borealis Agrolinz Melamine GmbH, Австрія), діоксид титану (TiO₂)

марки Ti-Pure R-902 (DuPont, США), дисперсію співполімеру вінілацетату з етиленом (EVA) Vinnapas EZ 3010 (Wacker Chemical Corporation, США), графіт, що терморозширюється (EG), EG-250 (Beijing Great Wall Co Ltd, Китай). Як неорганічну підкладку для формування рулонного матеріалу застосовували сітку із скловолокна з розміром комірок 5 x 5 мм (Tianrui, Китай), мати з керамоволокна (Luyang Unifrax Trading, Китай), скловолокно Cem fil (Owens Corning, США), мінеральні волокна Lapinus (Rockwool BV, Нідерланди).

Приготування інтумесцентних композицій (IFR). У дисольвер лабораторний з об'ємом робочої чаші 1 дм³ поміщали воду та компоненти інтумесцентної композиції: поліфосфат амонію, пентаеритрит, меламін, діоксид титану за необхідних співвідношень. Суміш перемішували протягом 60 хв за швидкості фрези 900–1000 об/хв. Потім додавали терморозширюваний графіт (EG) або спучений графіт (SG) та перемішували протягом 15 хв за швидкості фрези 500–600 об/хв. До отриманої пасти додавали водну дисперсію полімеру та перемішували за швидкості фрези 500–600 об/хв протягом 30 хв. Готову IFR композицію зберігали в герметичній ємності. Рецептури IFR, що досліджувалися, представлені в табл. 1. Для приготування інтумесцентних композицій додатково застосовували диспергатор, піногасник і загущувач у кількостях 1–2 мас. %.

Формування рулонного покриття типу IFR – неорганічна підкладка (RC). У дисольвер лабораторний з об'ємом робочої чаші 0,3 дм³ поміщали 100 г інтумесцентної композиції (табл. 1) та 7 г волокна. Суміш перемішували протягом 30 хв за швидкості фрези 500–600 об/хв до максимального диспергування волокна в IFR. Отриману композицію наносили на поліетиленову плівку квадратом 15 x 15 см та товщиною мокрого покриття 2,0 ± 0,2 мм.

На сітку зі скловолокна, закріплену на поліетиленовій плівці, наносили 50 ± 5 г інтумесцентної композиції (табл. 1) квадратом 15 x 15 см та товщиною мокрого покриття 2,0 ± 0,2 мм. Вага фрагмента скловолокна розміром 15 x 15 см становила 2,0 ± 0,1 г. Аналогічно формували покриття на тонкому шарі мату з керамоволокна. Вага фрагмента мату із керамоволокна розміром 15 x 15 см становила 7,0 ± 0,5 г.

Зразки витримували за кімнатної температури протягом не менше ніж 20 діб, відокремлювали від поліетиленової плівки та використовували для вогневих випробувань. Склад і назва рулонних покриттів наведені в табл. 2, а зовнішній вигляд – на рис. 1.

Спучений графіт (SG) отримували з графіту EG-250 в умовах термоудару за температури 800–1000 °С. Методика вогневих випробувань за методом «пальника Бунзена» детально описана в роботі (Kalafat, 2020).

Таблиця 1

Співвідношення компонентів (%)¹ в інтумесцентних композиціях

№ IFR	APP	PE	MA	TiO2	EVA	EG	SG
IFR1	–	–	–	–	38,5	61,5	–
IFR2	31,5	–	–	–	37,0	31,5	–
IFR3	34,5	–	–	11,0	37,9	16,6	–
IFR4	38,0	11,4	14,2	14,2	22,2	–	–
IFR5	31,7	14,1	10,6	15,7	12,0	15,9	–
IFR6	27,8	11,6	12,0	12,0	20,7	15,9	–
IFR7	36,3	16,1	12,1	20,2	13,7	1,6	
IFR8	35,4	7,7	7,7	10,8	30,8	7,6	
IFR9	34,1	8,9	8,9	10,4	25,9	11,8	
IFR10	27,8	12,3	9,3	15,4	21,5	24,7	
IFR11	27,5	8,3	10,3	10,3	16,1	27,5	
IFR12	37,2	11,2	14,0	14,0	21,8	–	1,8
IFR13	36,6	11,0	13,7	13,7	21,4	–	3,6
IFR14	31,4	9,4	11,8	11,8	18,4	15,7	1,5
IFR15	30,9	9,3	11,6	11,6	18,1	15,5	3,0
IFR16	34,1	10,2	12,8	12,8	19,9	8,5	1,7
IFR17	33,5	10,1	12,6	12,6	19,6	8,4	3,2

Примітка. ¹Вміст компонентів надається в мас. % в перерахунку на сухе покриття.



Рис. 1. Зовнішній вигляд рулонних покриттів на різних неорганічних підкладках

Таблиця 2

Склад рулонних покриттів

Назва RC	IFR	Неорганічна підкладка, маса, г			
		Сем філ (скловолокно)	Lapinus, CF-50 (мінераловолокно)	Сітка зі скловолокна	Мат із керамоволокна
RC1	IFR1				7,0
RC2	IFR2				7,0
RC3	IFR3			2,0	
RC4	IFR4	7,0			
RC5	IFR5				7,0
RC6	IFR5		7,0		
RC7	IFR5			2,0	
RC8	IFR6				7,0
RC9	FR6	7,0			
RC10	IFR6			2,0	
RC11	IFR6		7,0		
RC12	IFR7			2,0	
RC13	IFR8			2,0	
RC14	IFR9			2,0	
RC15	IFR10			2,0	
RC16	IFR11			2,0	
RC17	IFR12			2,0	
RC18	IFR13			2,0	
RC19	IFR14			2,0	
RC20	IFR15			2,0	
RC21	IFR16			2,0	
RC22	IFR17			2,0	

Результати та їх обговорення

Інтумесцентні вогнезахисні композиції, що представлені в табл. 1, були приготовані з варіюванням складу інтумесцентної системи за основними компонентами – APP, MA, PE (IFR1–IFR6), вмісту EG (IFR5–IFR11) та SG (IFR12–IFR17). Рулонні вогнезахисні покриття, виготовлені, як описано в експериментальній частині, складаються із шару відповідної композиції IFR та неорганічної підкладки (табл. 2).

За методом «пальника Бунзена» визначали швидкість спучення інтумесцентних композицій та зростання температури на зворотній частині пластини протягом певного часу. На рис. 2 на прикладі спалювання рулонного покриття RC5 із залученням «пальника Бунзена» продемонстровано основні етапи цього процесу: а) зовнішній вигляд покриття перед випробуваннями; б) спучений шар в умовах вогневого впливу;

в) теплозахисний шар після досягнення 350 °С; г) структура отриманого коксового шару.

Шляхом цього експерименту визначили такі параметри (рис. 3):

– R, хв – час досягнення на зворотному боці пластини температури 350 °С;

– K – лінійний коефіцієнт спучення, що розраховується як відношення товщини спученого шару при закінченні експерименту до товщини вихідного покриття;

– V, °С/хв – швидкість нагріву металевої пластини на ділянці залежності температури на зворотному боці пластини від часу, що розташована перед початком умовного температурного плато.

Отримані результати наведено в табл. 3, приклад залежності температури на зворотному боці пластини від часу для рулонних покриттів RC12–RC15 наведено на рис. 4. Аналіз даних випробувань за методом «паль-

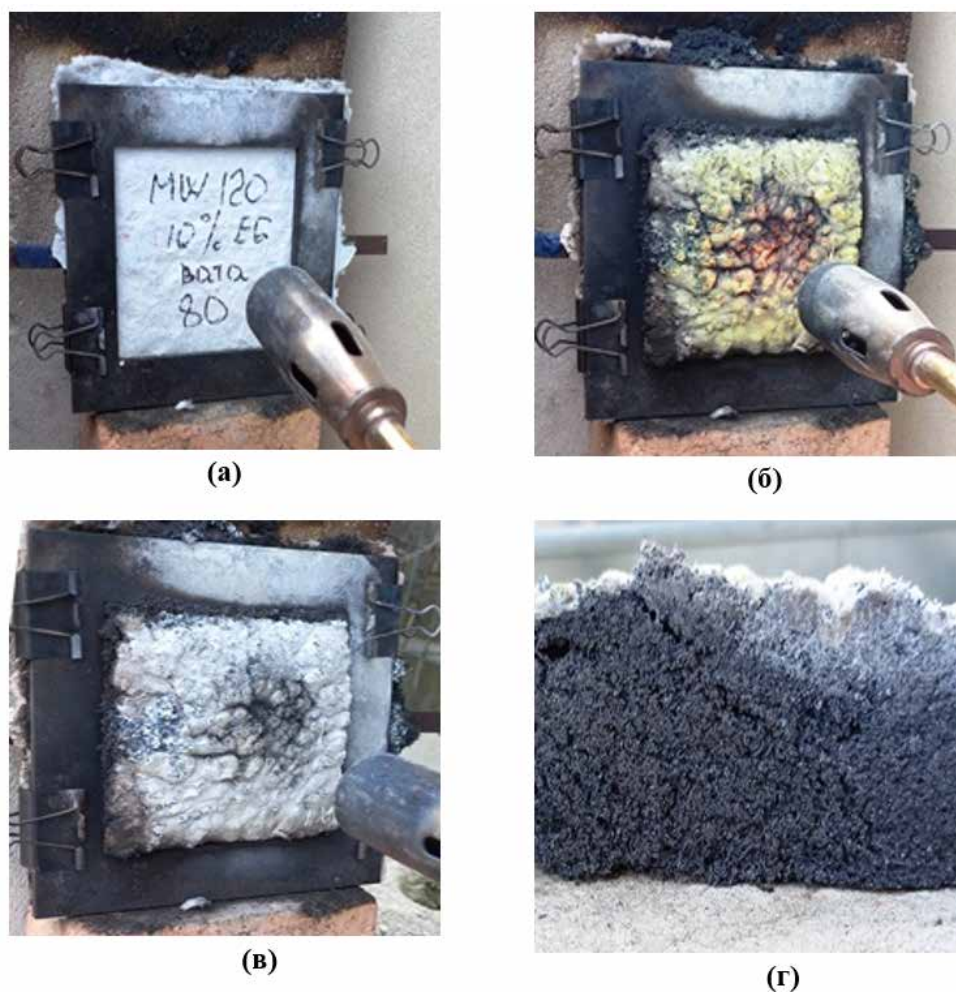


Рис. 2. Визначення вогнезахисної ефективності покриття RC5 за методом «пальника Бунзена»

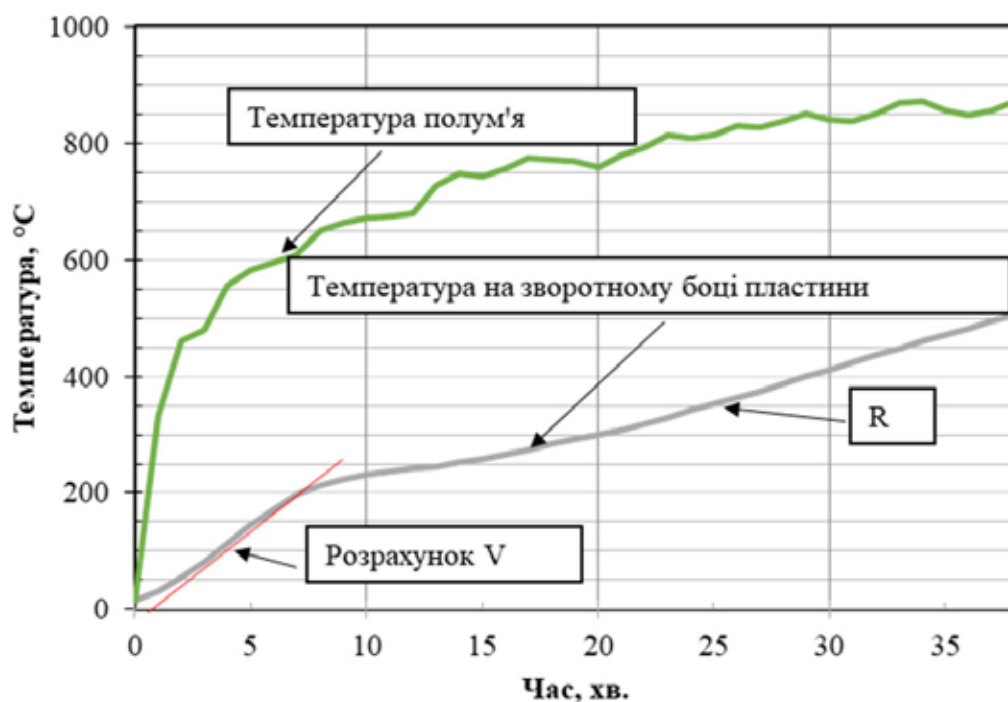


Рис. 3. Показники пристрою АВПК «TEST-1» (Kalafat, 2020)

Таблиця 3
Результати дослідження вогнезахисної ефективності рулонних покриттів за методом «пальника Бунзена»

№ RC	V, °C/хв	K	R, хв
RC1	60,5	30	8
RC2	7,23	42	> 60
RC3	10,1	20	18
RC4	12,6	41	21
RC5	10,4	30	19
RC6	13,2	20	27
RC7	9,8	45	28
RC8	9,3	28	> 60
RC9	12,2	26	31
RC10	14,9	55	> 60
RC11	9,20	32	> 60
RC12	8,92	42	18
RC13	15,0	45	12
RC14	13,3	52	35
RC15	10,9	58	39
RC16	11,3	72	35
RC17	12,5	39	> 60
RC18	11,4	26	25
RC19	10,2	56	> 60
RC20	10,5	54	> 60
RC21	11,1	42	> 60
RC22	9,93	45	> 60

ника Бунзена» дає змогу зробити висновки та певні рекомендації щодо застосування графітів та неорганічних носіїв для виготовлення рулонних вогнезахисних покриттів.

Покриття демонструють різну здатність до обмеження теплопередачі, що свідчить про неоднакову ефективність спучення, формування коксового шару та теплоізоляційних властивостей матеріалів. Найефективніші покриття – ті, де крива температури виходить на плато на рівні нижче за 300–350 °C, що вказує на стабільне термоізолююче спучення з утворенням міцного коксового шару.

Як підтверджено порівнянням залежності температури від часу для рулонного покриття RC1 з іншими зразками (табл. 3), терморозширюваний графіт у будь-яких кількостях не може бути самостійним інтумесцентним компонентом у парі полімер / графіт. Задовільні вогнезахисні властивості полімеру надають добавки графіту лише у складі з APP або APP / MA / PE.

Зразки RC12–RC13 та RC19–RC22, що містять IFR з варіацією графітових наповнювачів (EG, SG), підтверджують, що оптимальні результати досягаються за використання EG у невеликих кількостях (до 5%), а SG – до 1%.

Добавки EG є доцільними в системі APP / MA / PE / полімер, які характе-

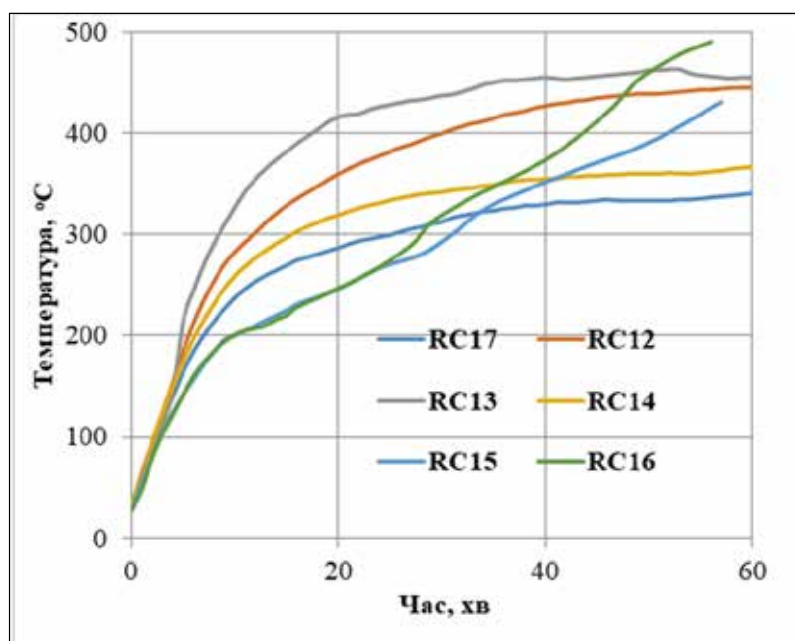


Рис. 4. Залежність температури на зворотному боці пластини від часу для рулонних покриттів RC12–RC17

рижуються раннім інтенсивним спученням за T 150–200 °C, як, наприклад, IFR6. Незалежно від типу неорганічної підкладки рулонні покриття RC8 (мат із керамоволокна + IFR6), RC10 (сітка із скловолокна + IFR6), RC11 (Lapinus, CF-50 + IFR6) у присутності EG забезпечують межу вогнестійкості $R > 60$ хв. Аналогічні рулонні покриття з інтумесцентним складом IFR5, який спучується за $T > 220$ °C, RC5–RC7 (табл. 3) здатні забезпечити межу вогнестійкості R лише 19–28 хв.

Порівняння температурних кривих для різних RC свідчить, що ефективність зниження температури на зворотному боці пластини залежить насамперед від рецептури IFR. Покриття на основі IFR6 (RC8–RC11) демонструють помітно кращі характеристики порівняно з IFR1–IFR3. Це вказує на важливість присутності всіх трьох компонентів інтумесцентної тріади (APP / MA / PE) у складі IFR, а також можливий синергізм із графітовими наповнювачами.

Тип неорганічної підкладки також впливає на результат. Покриття з сіткою зі скловолокна (RC7, RC10, RC19) забезпечують кращу термоізоляцію порівняно з покриттями на мінерало- або керамоволокнистій підкладці. Сітка зі скловолокна зміцнює утворений коксовий шар: вона

«вплітається» в структуру піни, підвищуючи її механічну стабільність і стійкість до руйнування. У випадках RC6, RC9 (волокна Cem fil або Lapinus) спостерігається зменшення коефіцієнта спучення, що, ймовірно, пов'язано з пригніченням цього процесу через високу щільність неорганічних волокон. Зниження кількості волокна призводить до зниження міцності та гнучкості рулонного виробу.

Найбільш ефективним і привабливим у практично-промисловій площині є рулонне покриття на основі сітки зі скловолокна. За результатами спалення покриттів за методом «пальника Бунзена», а також за візуальними спостереженнями присутність сітки в IFR не впливає на спучувальні та вогнестійкі властивості покриття. Ба більше, у ряді випадків вона слугує додатковим армувальним інструментом, що зміцнює утворений коксовий шар.

Висновки

Таким чином, проведені дослідження дають змогу стверджувати, що:

- домішки терморозширюваного графіту є доцільними в інтумесцентну складову рулонного покриття (APP/MA/PE/полімер), яка самостійно спучується за T 150–200 °C;
- найкращу вогнезахисну ефективність демонструють системи APP / MA / PE / полімер, які містять не більше ніж 5% термороз-

ширюваного графіту (EG) та не більше ніж 1% спученого графіту (SG);

– вогнезахисні властивості рулонного матеріалу, де як неорганічна підкладка використовується сітка із скловолокна, перевершують аналогічні характеристики з додаванням Cem fil (скловолокна) та Larinus (мінерало-

волокна), які пригнічують процес спучення через високу щільність неорганічних волокон.

Запропоновані підходи до виготовлення рулонних вогнезахисних матеріалів можуть бути використані в промисловому виробництві для створення ефективних засобів мобільного вогнезахисту.

Список використаної літератури

Amir N., Ahmad F., Megat-Yusoff P.S.M. Study on the Fibre Reinforced Epoxy-Based Intumescent Coating Formulations and their Char Characteristics. *Journal of Applied Sciences*. 2011. Vol. 11. P. 1678–1687. <https://doi.org/10.3923/jas.2011.1678.1687>.

Amir N., Ahmad F., Megat Yusoff P.S.M. Char Strength of Wool Fibre Reinforced Epoxy-Based Intumescent Coatings (FRIC). *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 626. P. 504–508. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.626.504>.

Brent K.M., T'ien J.S. Performance optimization of thin fire blankets by varying their radiative properties. *Journal of Fire Sciences*. 2022. Vol. 40 (1). P. 26–43. <https://doi.org/10.1177/07349041211050328>.

Chin W.K., Mulkern T.J., Tewarson A. Fire-Resistant and Fragment Penetration-Resistant Blankets for the Protection of Stored Ammunition. Aberdeen Proving Ground, MD: *Army Research Laboratory*, 2000. 71 p. [Електронний ресурс]. URL: https://archive.org/details/DTIC_ADA383514/page/n3/mode/2up (дата звернення: 14.03.2025).

Gernay T. Performance-based design for structures in fire: Advances, challenges, and perspectives. *Fire Safety Journal*. 2024. Vol. 142. 104036. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.104036>.

Gravit M., Korolchenko D., Nedviga E., Portnov F., Diachenko S. Impact of jet fires on steel structures: application of passive fire protection materials. *Fire*. 2024a. Vol. 7. 281. <https://doi.org/10.3390/fire7080281>.

Gravit M., Prusakov V., Shcheglov N., Kotlyarskaya I. Fire protection of steel structures of oil and gas facilities: multilayer, removable, non-combustible covers. *Fire*. 2024b. No. 7. 86. <https://doi.org/10.3390/fire7030086>.

Kalafat K., Taran N., Plavan V., Bessarabov V., Zagoriy G., Vakhitova L. Comparison of fire resistance of polymers in intumescent coatings for steel structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. No. 4 (10 (106)). P. 45–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209841>.

Kmeťová E., Kačíková D., Kačík F. The Effect of intumescent coating containing expandable graphite onto spruce wood. *Coatings*. 2024. Vol. 14. 490. <https://doi.org/10.3390/coatings14040490>.

Ma L., Song Q., Dong F., Yang H., Xia Z., Liu J. Effect of organic-inorganic mixed intumescent flame retardants on fire-retardant coating. *Coatings*. 2024. Vol. 14. 1034. <https://doi.org/10.3390/coatings14081034>.

Nolan D.P. Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical, and Related Facilities. Westwood: Noyes Publications, 2019. 426 p.

Otáhal R., Veselý D., Nášadová J., Zíma V., Němec P., Kalenda P. Intumescent coatings based on an organic-inorganic hybrid resin and the effect. *Pigment & Resin Technology*. 2011. Vol. 40 (4). P. 247–253. <https://doi.org/10.1108/0369942111114732613>.

Shiu B.C., Huang C.H., Yang H.L., Chen Y.S., Lou C.W., Lin J.H. Construction sheets made of high-performance flame-retardant nonwoven fabrics and combustion-resistant polyurethane foam: preparation process and property evaluations. *Polymers*. 2023. Vol. 15 (4). 953. <https://doi.org/10.3390/polym15040953>.

Steau E., Mahendran M., Poologanathan K. Experimental study of fire resistant board configurations under standard fire conditions. *Fire Safety Journal*. 2020. Vol. 116. 103153. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103153>.

Takahashi F. Fire blanket and intumescent coating materials for failure resistance. *MRS Bulletin*. 2021. Vol. 46. P. 429–434. <https://doi.org/10.1557/s43577-021-00102-7>.

Tewarson A., Wu P.K., Chin W.K., Shuford R. Fire Blankets for Munition Protection: Flame and Heat Blocking Properties of Advanced Materials. *Army Research Laboratory*, 2001. 55 p.

[Електронний ресурс]. URL: https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA_387272.pdf (дата звернення: 12.02.2025).

Triantafyllidis Z., Bisby L. A. Fibre-reinforced intumescent fire protection coatings as a confining material for concrete columns. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 231. 117085. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117085>.

Vakhitova L., Kalafat K., Vakhitov R., Drizhd V. Improving the fire-retardant performance of industrial reactive coatings for steel building structures. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. e34729. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34729>.

Wang K., Le H. The development of cement-based, intumescent and geopolymer fire-retardation coatings for metal structures: a review. *Coatings*. 2023. Vol. 13. 495. <https://doi.org/10.3390/coatings13030495>.

Yasir M., Ahmad F., Yusoff P.S.M.M., Ullah S., Jimenez M. Latest trends for structural steel protection by using intumescent fire protective coatings: a review. *Surface Engineering*. 2019. Vol. 36 (4). P. 334–363. <https://doi.org/10.1080/02670844.2019.1636536>.

Zheng Z., Liu Y., Zhang L., Wang H. Synergistic effect of expandable graphite and intumescent flame retardants on the flame retardancy and thermal stability of polypropylene. *Journal of Materials Science*. 2016. Vol. 51 (12). P. 5857–5871. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-9887-6>.

References

Amir, N., Ahmad, F., & Megat-Yusoff, P.S.M. (2011). Study on the fibre reinforced epoxy-based intumescent coating formulations and their char characteristics. *Journal of Applied Sciences*, 11, 1678–1687. <https://doi.org/10.3923/jas.2011.1678.1687> [in English].

Amir, N., Ahmad, F., & Megat Yusoff, P. S. M. (2013). Char strength of wool fibre reinforced epoxy-based intumescent coatings (FRIC). *Advanced Materials Research*, 626, 504–508. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.626.504> [in English].

Brent, K.M., & T'ien, J.S. (2022). Performance optimization of thin fire blankets by varying their radiative properties. *Journal of Fire Sciences*, 40 (1), 26–43. <https://doi.org/10.1177/07349041211050328> [in English].

Chin, W.K., Mulkern, T.J., & Tewarson, A. (2000). Fire-resistant and fragment penetration-resistant blankets for the protection of stored ammunition (ARL-TR-2285). *Army Research Laboratory*. [Electronic resource] URL: https://archive.org/details/DTIC_ADA383514/page/n3/mode/2up (access date 14.03.2025) [in English].

Gernay, T. (2024). Performance-based design for structures in fire: Advances, challenges, and perspectives. *Fire Safety Journal*, 142, 104036. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.104036> [in English].

Gravit, M., Korolchenko, D., Nedviga, E., Portnov, F., & Diachenko, S. (2024a). Impact of jet fires on steel structures: Application of passive fire protection materials. *Fire*, 7, 281. <https://doi.org/10.3390/fire7080281> [in English].

Gravit, M., Prusakov, V., Shcheglov, N., & Kotlyarskaya, I. (2024b). Fire protection of steel structures of oil and gas facilities: Multilayer, removable, non-combustible covers. *Fire*, 7, 86. <https://doi.org/10.3390/fire7030086> [in English].

Kalafat, K., Taran, N., Plavan, V., Bessarabov, V., Zagoriy, G., & Vakhitova, L. (2020). Comparison of fire resistance of polymers in intumescent coatings for steel structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (10 (106)), 45–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209841> [in English].

Kmeťová, E., Kačíková, D., & Kačík, F. (2024). The effect of intumescent coating containing expandable graphite onto spruce wood. *Coatings*, 14, 490. <https://doi.org/10.3390/coatings14040490> [in English].

Ma, L., Song, Q., Dong, F., Yang, H., Xia, Z., & Liu, J. (2024). Effect of organic-inorganic mixed intumescent flame retardants on fire-retardant coating. *Coatings*, 14, 1034. <https://doi.org/10.3390/coatings14081034> [in English].

Nolan, D.P. (2019). Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical, and related facilities (4th ed.). Noyes Publications [in English].

- Otáhal, R., Veselý, D., Násadová, J., Zíma, V., Němec, P., & Kalenda, P. (2011). Intumescent coatings based on an organic-inorganic hybrid resin and the effect. *Pigment & Resin Technology*, 40 (4), 247–253. <https://doi.org/10.1108/03699421111147326> [in English].
- Shiu, B.C., Huang, C.H., Yang, H.L., Chen, Y.S., Lou, C.W., & Lin, J.H. (2023). Construction sheets made of high-performance flame-retardant nonwoven fabrics and combustion-resistant polyurethane foam: Preparation process and property evaluations. *Polymers*, 15 (4), 953. <https://doi.org/10.3390/polym15040953> [in English].
- Steau, E., Mahendran, M., & Poologanathan, K. (2020). Experimental study of fire resistant board configurations under standard fire conditions. *Fire Safety Journal*, 116, 103153. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103153> [in English].
- Takahashi, F. (2021). Fire blanket and intumescent coating materials for failure resistance. *MRS Bulletin*, 46, 429–434. <https://doi.org/10.1557/s43577-021-00102-7> [in English].
- Tewarson, A., Wu, P.K., Chin, W.K., & Shuford, R. (2001). Fire blankets for munition protection: Flame and heat blocking properties of advanced materials (ARL-TR-2398). *Army Research Laboratory*. [Electronic resource] URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA387272.pdf> (access date 12.02.2025) [in English].
- Triantafyllidis, Z., & Bisby, L.A. (2020). Fibre-reinforced intumescent fire protection coatings as a confining material for concrete columns. *Construction and Building Materials*, 231, 117085. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117085> [in English].
- Vakhitova, L., Kalafat, K., Vakhitov, R., & Drizhd, V. (2024). Improving the fire-retardant performance of industrial reactive coatings for steel building structures. *Heliyon*, 10, e34729. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34729> [in English].
- Wang, K., & Le, H. (2023). The development of cement-based, intumescent and geopolymer fire-retardation coatings for metal structures: A review. *Coatings*, 13, 495. <https://doi.org/10.3390/coatings13030495> [in English].
- Yasir, M., Ahmad, F., Yusoff, P.S.M.M., Ullah, S., & Jimenez, M. (2019). Latest trends for structural steel protection by using intumescent fire protective coatings: A review. *Surface Engineering*, 36 (4), 334–363. <https://doi.org/10.1080/02670844.2019.1636536> [in English].
- Zheng, Z., Liu, Y., Zhang, L., & Wang, H. (2016). Synergistic effect of expandable graphite and intumescent flame retardants on the flame retardancy and thermal stability of polypropylene. *Journal of Materials Science*, 51 (12), 5857–5871. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-9887-6> [in English].

Отримано: 23.04.2025
Прийнято: 15.05.2025



Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 12
Український журнал природничих наук
№ 12

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

УДК 637.046.133.2

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.11>

ВПЛИВ ТЕРМООБРОБКИ МОЛОКА НА РІВНОВАГИ ЗА УЧАСТЮ ІОННОГО КАЛЬЦІУ ТА ФОСФАТ-ІОНІВ

Н. П. Квітковська¹, В. М. Іщенко², О. В. Кочубей-Литвиненко³, М. В. Іщенко⁴

Термічна обробка молока є обов'язковою процедурою його очищення від шкідливих мікроорганізмів і продовження терміну його зберігання. Більшість методик оцінювання термічної обробки молока базуються на подальшому визначенні деяких компонентів продукту після нагрівання, наприклад, визначення активності ферментів, білків сироватки, продуктів реакції Майяра. У представленій роботі оцінено можливу кореляцію між основними мінеральними компонентами молока та ступенем його термічної обробки. Для дослідження було вибрано 17 комерційних зразків молока, серед яких: натуральне необроблене, пастеризоване, мікрофільтроване, ультрапастеризоване, стерилізоване, 2 зразка виготовленого відновленого молочного продукту та дві суміші пастеризованого та відновленого молока в різних співвідношеннях. Загальний вміст кальцію в молоці та вміст кальцію після відділення казеїну, так званий іонний, чи сироватковий, кальцій, визначали методом полуменевої атомно-абсорбційної спектроскопії. Вміст фосфат-іонів у досліджуваних зразках молока визначено методом іонної хроматографії з кондуктометричним детектором. Вміст загального фосфору визначено фотометрично з фосформолібденовою гетерополікислотою після сухого озолення проби.

Вміст сухого знежиреного молочного залишку, білку, жиру та лактози у зразках молока визначали за допомогою ультразвукового аналізатора "Ecomilk". Обробку всього масиву даних

¹ старший викладач кафедри харчової хімії
(Національний університет харчових технологій, м. Київ)
e-mail: suxodolska@ukr.net
ORCID: 0009-0008-3268-0510

² кандидат хімічних наук,
доцент кафедри харчової хімії
(Національний університет харчових технологій, м. Київ)
e-mail: ischenko_vn@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0218-8516

³ доктор технічних наук,
професор кафедри технології молока і молочних продуктів
(Національний університет харчових технологій, м. Київ)
e-mail: nniht_nuft@ukr.net
ORCID: 0000-0003-0712-448X

⁴ кандидат хімічних наук,
доцент кафедри аналітичної хімії
(Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ)
e-mail: ischenko_mv@knu.ua
ORCID: 0000-0002-0851-1679

було проведено хеометрично, методом головних компонент. Установлено, що в окрему групу виділяються зразки відновленого молока та сумішей відновленого молока з пастеризованим. За графіком навантажень першої та другої компоненти відмічається, що основною відмінністю у зразках є відношення іонного фосфату до загального фосфору та вміст загального білка.

Ключові слова: молоко, мінеральний склад, термічна обробка, хеометрика.

THE EFFECT OF HEAT TREATMENT OF MILK ON EQUILIBRIA INVOLVING IONIC CALCIUM AND PHOSPHATE IONS

N. P. Kvitkovska, V. M. Ishchenko, O. V. Kochubei-Lytvynenko, M. V. Ishchenko

Heat treatment of milk is a mandatory procedure for its purification from harmful microorganisms and extension of its shelf life. Most methods for assessing the heat treatment of milk are based on the subsequent determination of some components of the product after heating, for example, determination of enzyme activity, whey proteins, Maillard reaction products. In the presented work, an assessment of the possible correlation between the main mineral components of milk and the degree of its heat treatment was carried out. 17 commercial samples of milk were selected for the study, including: natural raw, pasteurized, microfiltered, ultrapasteurized, sterilized, 2 samples of manufactured reconstituted milk product and two mixtures of pasteurized and reconstituted milk in different ratios. The total calcium content in milk and the calcium content after casein separation, the so-called ionic or serum calcium, were determined by flame atomic absorption spectroscopy. The content of phosphate ions in the studied milk samples was determined by ion chromatography with a conductometric detector. The content of total phosphorus was determined photometrically with phosphoromolybdenum heteropolyacid after dry ashing of the sample. The content of dry non-fat milk residue, protein, fat and lactose in milk samples was determined using an Ecomilk ultrasonic analyzer. The processing of the entire data set was carried out chemometrically, using the principal component method. It was established that samples of reconstituted milk and mixtures of reconstituted milk with pasteurized milk are allocated to a separate group. According to the graph of the loadings of the first and second components, it is noted that the main difference in the samples is the ratio of ionic phosphate to total phosphorus and the content of total protein.

Key words: milk, mineral composition, heat treatment, chemometrics.

Вступ

Термічна обробка є основною процедурою в молочній промисловості для гарантування безпеки молока та продовження терміну його зберігання. Більшість аналітичних методів визначення інтенсивності термічної обробки (пастеризація, ультрапастеризація і стерилізація) ґрунтуються на визначенні органічних складників молока – активності ферментів, білків сироватки, продуктів реакції Майяра (Ritota et al., 2017; den Oever & Mayer, 2021), оскільки мінеральні речовини молока становлять незначну його частину. Проте мінерали, що містяться в молоці, зокрема кальцій і фосфор, зумовляють його високу біологічну цінність. Також солі, що містяться в молоці, відіграють важливу роль у процесах, які відбуваються під час його термічної обробки. Солі можуть впливати на кілька процесів, які відбуваються в результаті нагрівання молока: асоціацію денатурованих сироваткових білків із міцелами казеїну, індуковану нагріванням дисоціацію k-казеїну, зміну

pH молока та кислотно-основні рівноваги (McSweeney & Fox, 2009; Huppertz et al., 2016; Anema, 2021).

Молоко містить приблизно 1% мінералів, як-от кальцій, магній, натрій, калій, а також аніонів фосфату, цитрату, сульфату, нітрату та хлорид-іонів. Деякі із цих компонентів, як-от Cl^- , Na^+ та K^+ , існують у молоці в іонній формі, а інші – у рівновазі між розчинною та колоїдною формами, а також можуть бути у складі білків, ферментів, нуклеїнових кислот (Jensen, 1996; Gancheron, 2005). Більше половини всіх мінеральних речовин молока становлять солі кальцію і фосфору. Уважається, що від 10 до 30% кальцію міститься в молоці в іонному стані (гідратовані іони Ca^{2+}); більша його частина у формі складного комплексу казеїнату кальцію з колоїдним фосфатом кальцію, а невелика кількість зв'язана з α -лактоальбуміном (Gancheron, 2005). Розподіл фосфору в молоці більш складний, ніж розподіл кальцію, оскільки частина фосфору є неорганічною (аніони ортофосфатної кис-

лоти), а частина – органічною і етерифікованою до казеїну, вуглеводів і фосфоліпідів (Nieuwenhuijse & Huppertz, 2022).

Більшість дослідників, які вивчали вплив термічної обробки молока на іонні рівноваги, зазначають зменшення концентрації іонного кальцію в молоці під час нагрівання в основному через утворення малорозчинного $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ та гідрофобних сполук кальцію з білками. Істотного зменшення фосфору в результаті пастеризації та ультрапастеризації молока не відбувається, оскільки фосфор, що входить до складу казеїнових міцел, може під час нагрівання відщеплюватися і переходити в іонний стан (Deeth & Lewis 2017; Barone et al., 2021).

Проте робіт, присвячених використанню співвідношень концентрацій іонного та загального кальцію і фосфору як маркерів на температурну обробку молока, нами не знайдено. Водночас цікавим є питання можливого використання таких кореляцій як маркерів на фальсифікацію пастеризованого молока його сухим аналогом (відновленим молоком).

Основним методом визначення вмісту кальцію в молоці є метод полум'яної атомно-абсорбційної спектроскопії (далі – ПААС). Цей метод характеризується простотою у використанні, є відносно недорогим і має високу точність і прецизійність (Sikiric et al., 2003). Для методу ПААС як пробопідготовку використовують сухе озолення з подальшим розчиненням у концентрованій хлоридній або нітратній кислоті та розбавленням дистильованою водою. Така пробопідготовка дозволяє усунути матричні впливи й ефективно перевести пробу у зручну форму для визначення (Leo & Toldrá, 2021), але потребує значного часу і є основним джерелом похибок, саме цю стадію аналізу вважають лімітованою.

Уміст загального фосфору в молоці в основному визначають спектрофотометрично. У дослідженні (Gliszczynska-Swigło & Rybicka, 2021) спектрофотометричний метод визначення з Молібденовим синім було застосовано для визначення вмісту фосфору в 65 молочних продуктах. Межа виявлення методу становить 0,37 мкг/мл, а його межа кількісного визначення – 1,13 мкг/мл.

Одним із сучасних методів визначення фосфат-іонів та інших основних аніонів молока є метод іонної хроматографії. В одній із перших робіт (Gaucheron et al., 1996) аніони молока були успішно визна-

чені методом іонної хроматографії з кондуктометричним детектором. Пробопідготовка включала ультрафільтрацію зразка й іноді поєднувалась із сухою мінералізацією. Цей метод дозволив одночасне визначення іонів хлориду, фосфату та цитрату з гарною відтворюваністю (відносно стандартне відхилення – приблизно 1%) і чутливістю (менше 20 мкг/кг). Було показано (Rahimi-Yazdi et al., 2010), що даний метод є перспективним у сфері дослідження впливів технологічної обробки молока на рівноваги солей у ньому.

В Україні вміст кальцію в молоці визначають за ДСТУ ISO 8070/IDF 119:2008 методом атомної абсорбції, а загального фосфору – за ДСТУ ISO 9874:2005 методом спектрометричної молекулярної абсорбції.

Проведення досліджень, які пов'язані з отриманням масиву експериментальних даних, потребують використання визначених статистичних і метрологічних процедур за їх аналізом. Такими процедурами обробки великого масиву одержаних даних є використання хемометричних інструментів (Rodionova & Pomerantsev, 2020).

Метою даної роботи було визначення вмісту основних неорганічних складників молока та таких показників якості молока, як уміст жиру, білка, лактози, сухого знежиреного молочного залишку (далі – СЗМЗ), у комерційних зразках молока та виготовлених напоїв, що містять сухе молоко, та встановлення можливої кореляції між умістом цих компонентів і ступенем термічної обробки.

Для досягнення мети необхідно було провести аналіз зразків молока та виготовлених напоїв фізико-хімічними методами й обробити одержані результати методами хемометрики.

Матеріал і методи

Для дослідження було вибрано 17 комерційних зразків молока та 4 зразки виготовленого молочного продукту. Зразкам були присвоєні відповідні позначення: натуральне необроблене (Н, один зразок), пастеризоване (П, шість зразків; позначення П1 – П6), мікрофільтроване (МФ, один зразок), ультрапастеризоване (УП, вісім зразків; позначення УП1 – УП8), стерилізоване (СТ1) та відновлений молочний напій (В, два зразки, В1 і В2). Відновлене молоко готували згідно з рецептурою, зазначеною на упаковці: 11,1 г молока розчиняли у 100 мл дистильованої води, нагрітої до $\approx 40^\circ\text{C}$. Також були виготовлені й досліджені суміші пастеризо-

ваного та відновленого молока у співвідношеннях (%) 70:30 та 80:20 відповідно (коди П5:В2-70:30 та П5:В2-80:20 відповідно). Комерційні зразки молока були українських виробників молочної продукції та придбані в супермаркетах м. Києва; один від одного вони відрізнялись за способом термічної обробки (пастеризація, ультрапастеризація, стерилізація та мікрофільтрація, яку характеризують як «лагідну» пастеризацію). Щодо виробників, то в основному це була продукція найбільших виробників молока в Україні.

Загальний уміст кальцію у зразках визначали методом ПААС згідно з ДСТУ ISO 8070/IDF 119:2008 після сухого озолення. Сироватковий (іонний) кальцій визначали методом ПААС після осадження казеїну ацетатним буфером за рН 4,8 та фільтрування розчину через мембранний фільтр 0,45 мкм. Інструментальний аналіз проводили на атомно-абсорбційному спектрометрі "Spectr AA-B50" (Varian Inc.), обладнаному пальником для полум'я ацетилен-повітря і лампою з порожнистим катодом на кальцій. Експериментальні умови визначення наведено в таблиці 1. Розрахунок умісту кальцію проводили за градувальним графіком.

Таблиця 1
Інструментальні параметри визначення кальцію методом ПААС

Параметр	Значення
Полум'я	Ацетилен – повітря
Довжина хвилі	422,7 нм
Спектральна щільність	0,5 нм
Струм лампи	10 мА
Корекція фону	відсутня

Вміст іонного фосфату визначали методом іонної хроматографії з кондуктометричним детектором на приладі Dionex™ ICS-5000 (Thermo), обладнаним колоною Dionex™ IonPac™ AS19 IC. Як рухому фазу використовували КОН із градієнтом, рекомендованим виробником обладнання. Пропідготовку зразків молока проводили аналогічно, як і під час визначення сироваткового кальцію. Концентрацію іонного фосфату визначали за градувальним графіком. Уміст загального фосфору визначали фотометрично з фосфоромолібденовою гетерополікислотою на однопроменевому спектрофотометрі «Юніко 1201» згідно з ДСТУ ISO 9874:2005. Уміст сухого знежиреного молочного залишку (СЗМЗ), білка, жиру та лактози у зразках молока визначали за допомогою ультразвукового аналізатора "Ecomilk" (Болгарія). Обробку всього масиву даних було проведено хемометрично, методом головних компонент у програмному середовищі продукту "Minitab 16".

Результати та їх обговорення

Дані визначення загального та сироваткового (іонного) кальцію $Ca_{\text{сир}}$, а також відношення концентрації сироваткового кальцію до загального $Ca_{\text{заг}}$ представлені в таблиці 2.

Як видно з даних таблиці, уміст сироваткового кальцію в необробленому зразку молока суттєво вищий, ніж у зразків молока після термообробки. Також спостерігається різниця між відношенням умісту сироваткового кальцію до загального кальцію в пастеризованому й ультрапастеризованому молоці. Результати t-тесту Стюдента для двох середніх вказують на статистичну значущість такої різниці ($p = 0,03$). Одержані

Таблиця 2
Результати визначення загального та сироваткового кальцію

Тип молока	Код	$Ca_{\text{сир}}$, мг/л	$Ca_{\text{заг}}$, мг/л	$Ca_{\text{сир}}/Ca_{\text{заг}}$
1	2	3	4	5
Натуральне необроблене	Н	320,4	1142	0,28
Пастеризоване	МФ	136	863	0,16
	П1	164,4	1 174	0,14
	П2	137,5	1 299	0,11
	П3	92,3	1 073	0,09
	П4	133,5	1 114	0,12
	П5	127	1 174	0,11
	П6	104,6	1 260	0,08
Суміші пастеризованого та відновленого молока	П5-В2 70:30	111	982	0,11
	П5-В2 80:20	68,3	1 109	0,06

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5
Відновлене	B1	90,1	1 268	0,07
	B2	120,8	970	0,12
Стерилізоване	СТ1	119,6	1 215	0,1
Ультрапастеризоване	УП1	109,8	1 502	0,07
	УП2	92,9	1 321	0,07
	УП3	112,9	1 463	0,08
	УП4	104,8	876	0,12
	УП5	104,5	1 594	0,07
	УП6	113,1	1 399	0,08
	УП7	84,1	742	0,11
	УП8	141,8	1 601	0,09

в нашому дослідженні результати узгоджуються з роботою (On-Nom et al., 2010), у якій була встановлена лінійна залежність між умістом іонного (сироваткового) кальцію та підвищенням температурної обробки молока.

Результати хроматографічного визначення іонного фосфату та фотометричного визначення загального фосфору, а також їх співвідношення наведено в таблиці 3.

З одержаних даних видно, що чіткої закономірності між співвідношенням $PO_4^{3-}/P_{\text{заг}}$ та типом молока не простежується, проте подальша обробка даних хеометричними методами показала, що це відношення

є основною відмінністю між досліджуваними зразками.

Уміст СЗМЗ, білка, жиру та лактози у зразках молока визначали за допомогою ультразвукового аналізатора “Ecomilk” (Болгарія). Усі показники перебувають у регламентованих для молока межах (табл. 4).

Обробка такого великого масиву даних неможлива традиційними статистичними методами, тому для пошуку взаємозв'язків між показниками нами було вибрано хеометричні методи.

Як розвідувальний аналіз нами було використано метод головних компонент

Таблиця 3
Результати визначення фосфат-іонів і загального фосфору в досліджуваних зразках

Тип молока	Проба	Фосфат, мг/л	$P_{\text{заг}}$, мг/л	$PO_4^{3-}/P_{\text{заг}}$
Натуральне необроблене	Н	675	734	0,92
	МФ	771	715	1,08
Пастеризоване	П1	688	2 273	0,3
	П2	724	1 064	0,68
	П3	684	693	0,99
	П4	677	745	0,91
	П5	725	769	0,94
	П6	758	761	1
Суміші пастеризованого та відновленого молока	П5-B2 70:30	447	668	0,67
	П5-B2 80:20	477	689	0,69
Відновлене	B1	578	333	1,73
	B2	620	480	1,29
Стерилізоване	СТ1	686	809	0,85
Ультрапастеризоване	УП1	627	836	0,75
	УП2	683	1 192	0,57
	УП3	691	595	1,16
	УП4	753	773	0,97
	УП5	667	1 003	0,66
	УП6	690	747	0,92
	УП7	653	323	2,02
	УП8	819	773	1,06

Таблиця 4

Результати визначення СЗМЗ, білка, жиру та лактози

Тип молока	Проба	СЗМЗ, %	Білок, %	Жир, %	Лактоза, %
Натуральне необроблене	Н	9,37	3,21	5,39	4,2
Пастеризоване	МФ	8,73	3,35	2,33	4,71
	П1	8,15	3,13	2,09	4,4
	П2	8,82	3,38	2,46	4,77
	П3	8,11	3,11	2,04	4,38
	П4	7,54	2,9	2	4,07
	П5	7,89	3,04	2,11	4,25
	П6	8,46	3,25	2,28	4,57
Суміші пастеризованого та відновленого молока	П5-В2 70:30	7,86	3,03	2,2	4,23
	П5-В2 80:20	7,85	3,02	2,27	4,23
Відновлене	В1	6,91	2,68	2,26	3,71
	В2	7,13	2,76	2,06	3,83
Стерилізоване	СТ1	8,29	3,2	2,88	4,46
Ультрапастеризоване	УП1	8,75	3,37	3,05	4,71
	УП2	8,1	3,11	2,17	4,38
	УП3	8,54	3,29	2,99	4,6
	УП4	8,19	3,15	2,38	4,42
	УП5	8,83	3,39	2,43	4,77
	УП6	7,95	3,07	2,88	4,27
	УП7	8,08	3,1	2,05	4,37
	УП8	8,58	3,29	2,23	4,64

(далі – ГК), що використовувався для компактифікації та кращої візуалізації експериментальних даних із метою пошуку кластерів або груп зразків. Обчислення проводили у програмному продукті “Minitab 19”. Метод дає можливість стиснути масив даних шляхом його зведення до масиву меншої розмірності та переведення початкових змінних до нових (головних компонент), що мають більшу інформативність.

До всіх даних для нівелювання впливу абсолютних значень була застосована стандартизація (автомасштабне перетворення на стандартні нормальні змінні). Метод головних компонент було застосовано до всього масиву даних. Загалом, перші три компоненти пояснюють приблизно 90% варіативності експериментальних даних. На рис. 1 наведено графік рахунків перших двох головних компонент, отриманих за експериментальними даними.

Зразки утворюють три групи: окремо виділяється зразок натурального необробленого молока, групи пастеризованого й ультрапастеризованого молока, важливим є те, що окремою є група відновленого молока та сумішей відновленого молока з пастеризованим. Очевидно, запропонований підхід можна використати як маркер для виявлення додавання сухого молока в пасте-

ризоване та напій, виготовлений із сухого молока. У цю групу ввійшли також два зразки, які не містили відновлене молоко (П4 і УП7). Можливо, під час їх виробництва була дещо порушена технологія; не виключена можливість і їх фальсифікації відновленим молоком. Графік навантажень головних компонент (рис. 2) вказує на те, що основною відмінністю у зразках відновленого молока та його сумішей порівняно з комерційними зразками молока є відношення іонного фосфату до загального фосфору. Також у цих зразках дещо занижений вміст загального білка. Проте не можна стверджувати, що тільки за значенням відношення іонного фосфату до загального фосфору можна однозначно ідентифікувати підробку. Видно, що на класифікацію зразків також впливає вміст лактози, білка та СЗМЗ. Такі результати узгоджуються з нашою попередньою роботою, де вдалося досягнути деякої дискримінації зразків на основі результатів, отриманих на автоматичному аналізаторі “Ecomilk” (Іщенко та ін., 2018). Також одержані результати підтверджують зроблене раніше дослідниками припущення, що жоден із маркерів сам собою не може бути використаний для ідентифікації підробок або порушення технології виробництва (Feinberg et al., 2006).

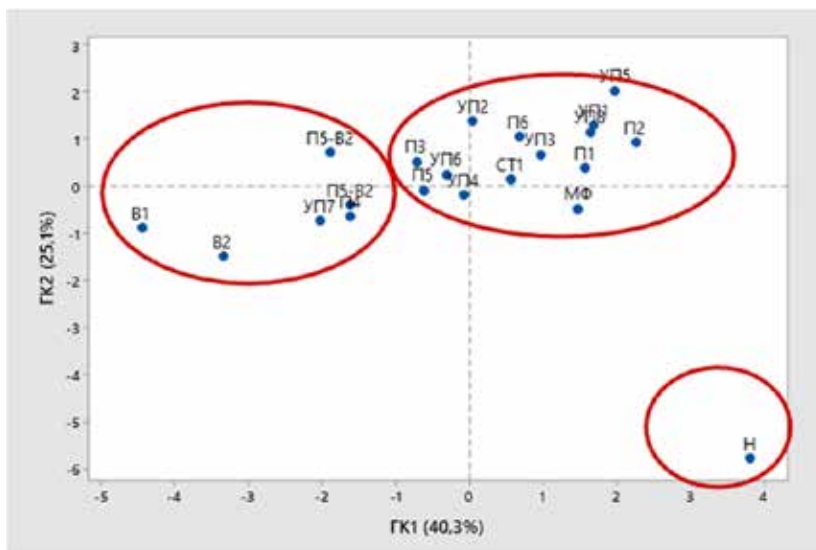


Рис. 1. Графік рахунків перших двох головних компонент

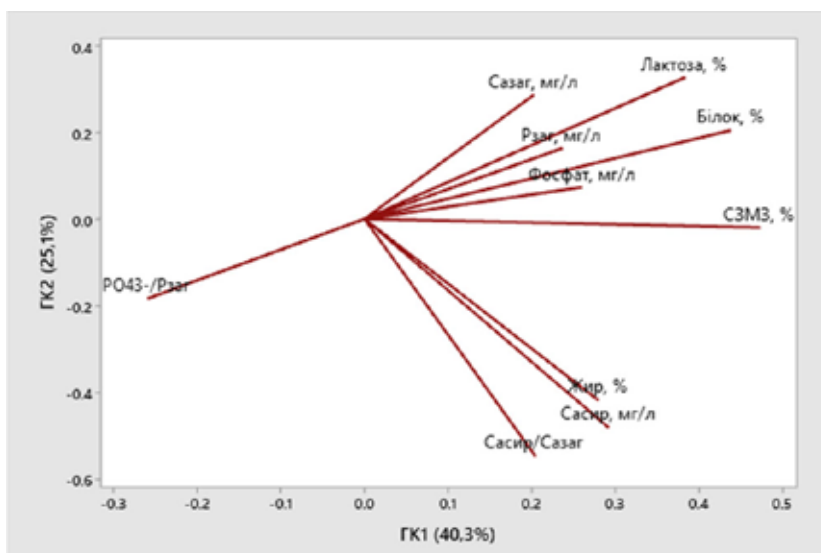


Рис. 2. Графік навантажень перших двох головних компонент

Висновки

У роботі проаналізовано партію комерційних зразків молока різного ступеня термічної обробки та виготовлених молочних напоїв із сухого молока на вміст основних неорганічних компонентів. У досліджуваних зразках молочної продукції також визначали вміст сухого знежиреного молочного залишку, лактози, білка та жиру. За допомогою методу головних компонент досліджено вплив термообробки на основні компоненти

молока та встановлено, що в окрему групу виділяються зразки відновленого молока та сумішей відновленого молока з пастеризованим. За графіком навантажень першої та другої компоненти встановлено, що основною відмінністю у зразках є відношення фосфат-іонів до загального фосфору та вміст загального білка. Проте деякі зразки молока не потрапляють в основну групу, що може свідчити про те, що ці зразки зроблені з порушеннями технології виробництва.

Список використаної літератури

Іщенко В.М., Квітківська Н.П., Кочубей-Литвиненко О.В., Іщенко М.В. Використання флуоресцентної спектроскопії та ультразвукового аналізу для ідентифікації молочної продукції. *Методи і об'єкти хімічного аналізу*. 2018. № 13 (3). С. 131–135. <https://doi.org/10.17721/mosa.2018.131-135>.

- Anema S.G. Heat-induced changes in caseins and casein micelles, including interactions with denatured whey proteins. *International Dairy Journal*. 2021. Vol. 122. P. 105136. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105136>.
- Barone G., Yazdi S., Lillevang S., Ahrne L. Calcium: A comprehensive review on quantification, interaction with milk proteins and implications for processing of dairy products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021. Vol. 20. № 5. P. 5616–5640. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12844>.
- Deeth H.C., Lewis M.J. High Temperature Processing of Milk and Milkproducts. 2017. UK, Chichester : John Wiley & Sons. 556 p. <https://doi.org/10.1002/9781118460467>.
- den Oever S.P., Mayer H.K. Analytical assessment of the intensity of heat treatment of milk and dairy products. *International Dairy Journal*. 2021. Vol. 121. P. 105097. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105097>.
- Feinberg M., Dupont D., Efstathiou T., Louâpre V., Guyonnet J.-P. Evaluation of tracers for the authentication of thermal treatments of milks. *Food Chemistry*. 2006. Vol. 98. P. 188–194. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.07.052>.
- Gancheron F. The mineral of milk. *Reproduction Nutrition Development*. 2005. Vol. 45. № 4. P. 473–483. <https://doi.org/10.1051/rnd:2005030>.
- Gaucheron F., Graet Y., Piot M., Boyaval E. Determination of anions of milk by ion chromatography. *Le Lait*. 1996. Vol. 76. № 5. P. 433–443. <https://doi.org/10.1051/lait:1996533>.
- Gliszczynska-Świgło A., Rybicka I. Fast and sensitive method for phosphorus determination in dairy products. *Journal of Consumer Protection and Food Safety*. 2021. Vol. 16. № 3. P. 213–218. <https://doi.org/10.1007/s00003-021-01329-x>.
- Huppertz T., Gazi I., Luyten H., Nieuwenhuijse H., Alting A., Schokker E. Hydration of casein micelles and caseinates: Implications for casein micelle structure. *International Dairy Journal*. 2017. Vol. 74. P. 1–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2017.03.006>.
- Jensen R.J. Handbook of Milk Composition. A volume in Food Science and Technology. Book. University of Connecticut, Storrs, Connecticut, 1995. P. 577–592. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384430-9.X5000-8>.
- Leo, M.L., Nollet Toldra F. Handbook of dairy foods analysis. 2nd Edition. CRC Press, 2021. P. 543–581. <https://doi.org/10.1201/9780429342967>.
- McSweeney P., Fox P.F. Advanced Dairy Chemistry. Volume 3 : Lactose, Water, Salts and Minor Constituents. Book. Springer New York, 2009. P. 351–389. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84865-5>.
- Nieuwenhuijse H., Huppertz T. Heat-induced changes in milk salts : A review. *International Dairy Journal*. 2022. Vol. 126. P. 105220. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105220>.
- On-Nom N., Grandison A.S., Lewis M.J. Measurement of ionic calcium, pH, and soluble divalent cations in milk at high temperature. *Journal of Dairy Science*. 2010. Vol. 93. № 2. P. 515–523. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2634>.
- Rodionova O.Ye, Pomerantsev A.L. Chemometric tools for food fraud detection: The role of target class in non-targeted analysis. *Food Chemistry*. 2020. Vol. 317. P. 126448. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126448>.
- Rahimi-Yazdi S., Ferrer M., Corredig M. Nonsuppressed ion chromatographic determination of total calcium in milk. *Journal of Dairy Science*. 2010. Vol. 93. № 5. P. 1788–1793. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2446>.
- Ritota M., Di Costanzo M., Mattera M., Manzi P. New Trends for the Evaluation of Heat Treatments of Milk. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*. 2017. Vol. 2017. P. 1864832. <https://doi.org/10.1155/2017/1864832>.
- Sikirić M., Brajenović N., Pavlović I., Havranek J. Determination of metals in cow's milk by flame atomic absorption spectrophotometry. *Czech Journal of Animal Science*. 2003. Vol. 48. № 11. P. 481–486.

References

- Ishchenko, V.M., Kvitkovska, N.P., Kochubei-Lytvynenko, O.V., & Ishchenko, M.V. (2018). Vykorystannia fluorestsentnoi spektroskopii ta ultrazvukovoho analizu dlia identyfikatsii molochnoi produktsii [Using fluorescence spectroscopy and ultrasonic analysis for dairy product identification]. *Metody i obiekty khimichnoho analizu [Methods and objects of chemical analysis]*, 13 (3), 131–135. <https://doi.org/10.17721/moca.2018.131-135> [in Ukrainian].

- Anema, S.G. (2021). Heat-induced changes in caseins and casein micelles, including interactions with denatured whey proteins. *International Dairy Journal*, 122, 105136. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105136> [in English].
- Barone, G., Yazdi, S., Lillevang, S., & Ahrne, L. (2021). Calcium: A comprehensive review on quantification, interaction with milk proteins and implications for processing of dairy products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20 (5), 5616–5640. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12844> [in English].
- Deeth, H.C., & Lewis, M.J. (2017). High Temperature Processing of Milk and Milkroducts. UK, Chichester: John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118460467> [in English].
- den Oever, S.P., & Mayer, H.K. (2021). Analytical assessment of the intensity of heat treatment of milk and dairy products. *International Dairy Journal*, 121, 105097. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105097> [in English].
- Feinberg, M., Dupont, D., Efstathiou, T., Louâpre, V., & Guyonnet J.-P. (2006). Evaluation of tracers for the authentication of thermal treatments of milks. *Food Chemistry*, 98, 188–194. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.07.052> [in English].
- Gancheron, F. (2005). The mineral of milk. *Reproduction Nutrition Development*, 45 (4), 473–483. <https://doi.org/10.1051/rnd:2005030> [in English].
- Gaucheron, F., Graet, Y., Piot, M., & Boyaval, E. (1996). Determination of anions of milk by ion chromatography. *Le Lait*, 76 (5), 433–443. <https://doi.org/10.1051/lait:1996533> [in English].
- Gliszczynska-Świgło, A., & Rybicka, I. (2021). Fast and sensitive method for phosphorus determination in dairy products. *Journal of Consumer Protection and Food Safety*, 16 (3), 213–218. <https://doi.org/10.1007/s00003-021-01329-x> [in English].
- Huppertz, T., Gazi, I., Luyten, H., Nieuwenhuijse, H., Altling, A., & Schokker E. (2017). Hydration of casein micelles and caseinates: Implications for casein micelle structure. *International Dairy Journal*, 74, 1–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2017.03.006> [in English].
- Jensen, R.J. (1995). Handbook of Milk Composition. A volume in Food Science and Technology. Connecticut: University of Connecticut, Storrs. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384430-9.X5000-8> [in English].
- Leo, M.L., & Nollet Toldra, F. (2021). Handbook of dairy foods analysis. (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429342967> [in English].
- McSweeney, P., & Fox, P.F. (2009). Advanced Dairy Chemistry. Volume 3: Lactose, Water, Salts and Minor Constituents. Book. New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84865-5> [in English].
- Nieuwenhuijse, H., & Huppertz, T. (2022). Heat-induced changes in milk salts: A review. *International Dairy Journal*, 126, 105220. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105220> [in English].
- On-Nom, N., Grandison, A.S., & Lewis, M.J. (2010). Measurement of ionic calcium, pH, and soluble divalent cations in milk at high temperature. *Journal of Dairy Science*, 93, (2), 515–523. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2634> [in English].
- Rodionova, O.Ye., & Pomerantsev, A.L. (2020). Chemometric tools for food fraud detection: The role of target class in non-targeted analysis. *Food Chemistry*, 317, 126448. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126448> [in English].
- Rahimi-Yazdi, S., Ferrer, M., & Corredig, M. (2010). Nonsuppressed ion chromatographic determination of total calcium in milk. *Journal of Dairy Science*, 93 (5), 1788–1793. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2446> [in English].
- Ritota, M., Di Costanzo, M., Mattera, M., Manzi P. (2017). New Trends for the Evaluation of Heat Treatments of Milk. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2017, 1864832. <https://doi.org/10.1155/2017/1864832> [in English].
- Sikircic, M., Brajenovic, N., Pavlovic, I., & Havranek J. (2003). Determination of metals in cow's milk by flame atomic absorption spectrophotometry. *Czech Journal of Animal Science*, 48 (11), 481–486 [in English].

Отримано: 25.04.2025
Прийнято: 15.05.2025



УДК 66:330.341.1][045)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.12>

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ВИРОБНИЦТВІ ТА ЗАСТОСУВАННІ НЕОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН

О. В. Кочубей¹, Н. Ю. Душечкіна²

У статті представлено результати аналізу й узагальнення інноваційних технологій, що застосовуються у виробництві та практичному використанні неорганічних речовин. Актуальність теми зумовлена зростанням вимог до якості матеріалів, енергоефективності виробництва й екологічної безпеки в хімічній промисловості. У центрі дослідження – технології, що базуються на використанні цифрових рішень (SCADA, IoT, штучного інтелекту), наноматеріалів, а також новітніх методів синтезу (електрохімічних, гідрометалургійних, каталітичних).

Проведено комплексне оцінювання фізико-хімічних властивостей синтезованих неорганічних речовин із застосуванням методів спектрального аналізу, рентгеноструктурного аналізу та термогравіметрії. Встановлено, що отримані зразки характеризуються високою термічною стабільністю (900–1 200 °C), електропровідністю (10^{-2} – 10^0 S/см), підвищеною каталітичною активністю (прискорення реакцій на 60–80%) та механічною міцністю (>120 МПа). Експериментальні дані свідчать про ефективність цифрових платформ керування: упровадження SCADA-систем та IoT-сенсорів дозволило знизити енергоспоживання на 18,4%, зменшити брак продукції на 23,7% та забезпечити високу точність дозування реагентів ($\pm 0,5\%$). Застосування алгоритмів машинного навчання сприяло оптимізації технологічних режимів, зменшенню часу реакцій на 12–15% та підвищенню точності прогнозування відхилень до 95–97%. Досліджено вплив нанотехнологій на покращення експлуатаційних характеристик матеріалів, зокрема фотокаталітичної активності (до 60%) та сорбційної здатності до важких металів (до 4,2 мг/г). Екологічний аналіз підтвердив доцільність використання вторинної сировини, що дозволяє скоротити споживання природних ресурсів на 25–30%.

Результати дослідження доводять, що комплексне впровадження інноваційних підходів у виробництво неорганічних речовин відкриває нові перспективи для хімічної галузі в умовах

¹ доктор філософії,
викладач кафедри хімії та екології
(Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, м. Умань)
e-mail: snclena@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5047-6694

² кандидат педагогічних наук, доцент,
доцент кафедри хімії та екології
(Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, м. Умань)
e-mail: nataxeta74@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4203-7122

сталого розвитку. У роботі запропоновано системну модель поєднання цифрових і технологічних рішень для підвищення ефективності, якості й екологічної безпеки синтезу.

Ключові слова: неорганічні речовини, нанотехнології, цифровізація, автоматизація, штучний інтелект, зелена хімія, циркулярна економіка.

INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN THE PRODUCTION AND APPLICATION OF INORGANIC SUBSTANCES

O. V. Kochubei, N. Y. Dushechkina

The article presents an analytical and systematic overview of innovative technologies applied in the production and use of inorganic substances. The relevance of the study is driven by increasing demands for material quality, energy efficiency, and environmental safety in the chemical industry.

The focus is placed on technologies based on digital solutions (SCADA, IoT, artificial intelligence), nanomaterials, and advanced synthesis methods (electrochemical, hydrometallurgical, catalytic). A comprehensive assessment of the physicochemical properties of synthesized inorganic materials was conducted using spectral analysis, X-ray diffraction, and thermogravimetric methods. It was established that the obtained materials exhibit high thermal stability (900–1 200 °C), electrical conductivity (10^{-2} – 10^0 S/cm), enhanced catalytic activity (reaction rate increased by 60–80%), and compressive strength exceeding 120 MPa. Experimental data confirm the effectiveness of digital control platforms: the implementation of SCADA systems and IoT sensors reduced energy consumption by 18,4%, decreased defective output by 23,7%, and improved reagent dosing accuracy to $\pm 0,5\%$. The use of machine learning algorithms contributed to the optimization of synthesis regimes, shortening reaction times by 12–15% and increasing deviation prediction accuracy to 95–97%. The study also explored the impact of nanotechnology on improving performance properties such as photocatalytic activity (up to 60%) and sorption capacity for heavy metals (up to 4,2 mg/g). Environmental analysis demonstrated the feasibility of using secondary raw materials, reducing the demand for primary resources by 25–30%.

The research results prove that the integrated application of innovative technological and digital solutions in the production of inorganic substances opens up new prospects for the chemical industry under sustainable development conditions. A system model for combining these solutions is proposed to enhance efficiency, quality, and environmental safety of synthesis processes.

Key words: inorganic substances, nanotechnology, digitalization, automation, artificial intelligence, green chemistry, circular economy.

Вступ

Раціональне використання природних ресурсів, зокрема у виробництві неорганічних речовин, потребує адаптації новітніх технологій до реалій екологічної ситуації в Україні (Білявська і Хом'як, 2020). Актуальність дослідження визначається потребою зменшення впливу промисловості на природні екосистеми, зокрема річкові долини, які виступають чутливими індикаторами антропогенного навантаження (Білявська і Хом'як, 2020).

В умовах активної трансформації промисловості на основі принципів сталого розвитку й цифровізації особливої актуальності набуває вдосконалення підходів до синтезу, модифікації та застосування неорганічних речовин. Неорганічні матеріали відіграють ключову роль у сучасній хімічній промисловості, енергетиці, медицині, електроніці й екології. Їх широке використання зумовлене унікальними

фізико-хімічними властивостями, зокрема високою термічною стабільністю, механічною міцністю, електропровідністю та каталітичною активністю (Alshammari et al., 2023).

Водночас традиційні технології виробництва неорганічних сполук супроводжуються високим рівнем енергоємності, використанню токсичних реагентів і значним антропогенним навантаженням на довкілля. Наприклад, класичний синтез аміаку за методом Габера – Боша залишається одним із наймасштабніших джерел промислових викидів CO_2 , що становить до 1,8% глобальних антропогенних викидів (Ghavam & Vahdati, 2021). Це підкреслює необхідність переходу до більш енергоефективних, екологічно безпечних і технологічно адаптивних методів виробництва, зокрема до синтезу із застосуванням нанотехнологій, золь-гель процесів, каталітичних схем і зелених хімічних методів (Barrino, 2024).

Особливу увагу сучасна наука приділяє також інтеграції цифрових рішень у виробничі цикли – як-от автоматизовані системи керування (SCADA), промисловий інтернет речей (IIoT), хмарні платформи, аналітика великих даних і штучний інтелект (Netzer, 2017; Pietrasik et al., 2024). Згідно з аналітичними прогнозами, цифровізація дозволяє знижувати виробничі витрати на 4–5% щорічно та підвищувати рентабельність хімічних підприємств завдяки гнучкості, самонавчанню систем і прогнозованому обслуговуванню (EY, 2022; Allied ..., 2022).

Водночас упровадження інноваційних технологій стикається з низкою викликів: від складності масштабування нанопроцесів і високої вартості прекурсорів до потреби у стандартизації безпеки наноматеріалів і забезпечення кіберзахисту цифрових платформ (Asare-Donkor et al., 2023). Саме тому постає потреба в системному аналізі сучасних технологічних рішень у неорганічному виробництві з позиції їхньої ефективності, екологічності, галузевої адаптації та майбутніх перспектив.

Мета дослідження – здійснити аналіз сучасних інноваційних технологій у виробництві та застосуванні неорганічних речовин; охарактеризувати основні методи наносинтезу, автоматизації та цифровізації хімічних процесів; узагальнити приклади практичного застосування інноваційних неорганічних матеріалів у сфері екології, енергетики, медицини й електроніки; визначити обмеження і перспективи подальшого розвитку галузі.

Матеріал і методи

Методологія дослідження базується на комплексному підході, що поєднує аналіз сучасних наукових джерел, експериментальне моделювання технологічних процесів, лабораторні дослідження та використання цифрових методів контролю. Теоретичну базу становлять публікації, індексовані в наукометричних базах “Scopus” і “Web of Science”, аналітичні звіти міжнародних організацій, результати прикладних досліджень, а також офіційні документи, присвячені технологіям сталого виробництва в хімічній промисловості (Netzer, 2017; Pietrasik et al., 2024).

У дослідженні застосовувалися як теоретичні, так і практичні методи. Теоретичний компонент включав аналіз, систематизацію та порівняння інноваційних технологій у виробництві неорганічних речовин, зокрема нанотехнологій, золь-гель синтезу,

гетерогенного каталізу, цифрового моделювання і автоматизованого управління. Порівняльний метод дозволив оцінити ефективність традиційних та інноваційних підходів у контексті їхнього впливу на якість продукції, енергоспоживання та екологічні показники (Alshammari et al., 2023; Olawade et al., 2024).

Практичну частину реалізовано через лабораторне моделювання виробничих процесів із використанням SCADA-систем та IoT-сенсорів, які забезпечували безперервний моніторинг ключових параметрів – температури, тиску, pH, концентрацій реагентів. Встановлено цифрові протоколи збору й обробки даних, що дозволило здійснювати корекцію процесів у реальному часі. Порівняння із традиційними схемами управління дало змогу зафіксувати підвищення стабільності, повторюваності та точності дозування в автоматизованому режимі (Allied ..., 2022; Automation ..., 2024).

Для прогнозування ефективності синтезу використовувалися математичні моделі, методи багатофакторного аналізу й алгоритми машинного навчання, реалізовані на основі даних зі SCADA та IoT-платформ. Застосування елементів штучного інтелекту дозволило здійснити оптимізацію температурно-часових режимів, забезпечити раннє виявлення відхилень і скоротити витрати ресурсів без втрати якості кінцевого продукту (EY, 2022; Olawade et al., 2024).

Фізико-хімічні властивості отриманих матеріалів визначалися з використанням сучасних методів: спектрального аналізу, рентгеноструктурного аналізу (XRD) та термогравіметрії (TGA). Застосування цих методів дозволило дослідити фазовий склад, термічну стабільність і хімічну чистоту синтезованих зразків. Для перевірки відтворюваності процесів здійснювався статистичний аналіз серій повторних експериментів в умовах автоматизованого управління.

Отже, дослідження реалізовано з використанням міждисциплінарного інструментарію, що включає сучасні методи хімічного аналізу, цифрові технології управління та алгоритмічні засоби прогнозування, що забезпечує високу достовірність результатів і можливість практичного застосування отриманих висновків у виробництві неорганічних речовин, особливо в екологічно чутливих і енергозалежних галузях.

Результати

Результати дослідження підтвердили ефективність упровадження інноваційних

Таблиця 2

Порівняння ефективності методів виробництва неорганічних матеріалів

Метод виробництва	Чистота речовини / ефективність
Електрохімічний	До 99,9%
Гідрометалургійний	Вилучення понад 85%
Каталітичний	Зниження температури реакції на ≈ 200 °C

підходів до синтезу й управління процесами виробництва неорганічних речовин. У процесі моделювання та експериментального випробування з використанням автоматизованих систем SCADA та IoT-сенсорів було зафіксовано низку важливих кількісних змін. Зокрема, застосування цифрового моніторингу дозволило скоротити енергоспоживання в середньому на 18,4%, зменшити кількість бракованої продукції на 23,7% та підвищити точність дозування реагентів до похибки $\pm 0,5\%$ (Pietrasik et al., 2024; Automation ..., 2024).

Лабораторні дослідження фізико-хімічних характеристик отриманих матеріалів показали високу термічну стабільність у межах 900–1 200 °C, електропровідність на рівні 10^{-2} – 10^0 S/см та каталітичну активність зі зростанням швидкості реакцій на 60–80%, міцність на стиск понад 120 МПа, порівняно з контрольними зразками (Alshammari et al., 2023). Рентгеноструктурний аналіз виявив чітко виражену кристалічну структуру з високим ступенем упорядкування, що свідчить про ефективність вибраних умов синтезу. Термогравіметрія підтвердила зниження масових втрат за нагрівання, що вказує на підвищену стабільність матеріалів у високотемпературному середовищі.

Дані зведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Фізико-хімічні характеристики синтезованих неорганічних речовин

Параметр	Результат
Температурна стабільність	900–1 200 °C
Електропровідність	10^{-2} – 10^0 S/см
Каталітична активність (збільшення швидкості реакцій)	60–80%
Міцність на стиск	>120 МПа

Аналіз технологічних підходів до виробництва неорганічних матеріалів показав, що серед методів синтезу найбільш ефективними є електрохімічні, гідрометалургійні, каталітичні та термохімічні. Вони забезпечують отримання матеріалів із заданими експлуатаційними характеристиками. Наприклад, електрохімічні методи дозволили досягти чистоти понад 99,9% у синтезі оксидів металів, а гідрометалургійні процеси забезпечили вилучення понад 85% цільового компонента під час обробки вторинної сировини. Застосування каталітичних схем дозволило знизити температуру перебігу реакцій у середньому на 200 °C. Узагальнені результати подано в таблиці 2.

Застосування цифрових технологій відіграло ключову роль в оптимізації виробничих процесів. Упровадження SCADA-систем та IoT-сенсорів забезпечило постійний моніторинг температури, pH, концентрації реагентів та інших критичних параметрів синтезу. У результаті було досягнуто зниження енергоспоживання на 18,4%, скорочення браку продукції на 23,7% та покращення точності дозування реагентів до похибки $\pm 0,5\%$.

Оцінювання ефективності процесу синтезу з використанням штучного інтелекту та математичних моделей засвідчило зростання виходу цільового продукту на 10–14%, зниження кількості відходів на 20% і підвищення повторюваності результатів (EY, 2022; Olawade et al., 2024). Під час 60-денного безперервного моніторингу синтезу в напівпромислових умовах було зафіксовано зменшення часу реакцій на 12–15%, а стандартне відхилення параметрів процесу не перевищувало $\sigma = 0,03$, що свідчить про високу стабільність технології.

Застосування алгоритмів машинного навчання дало змогу не лише оптимізувати технологічні параметри, а й передбачити відхилення з точністю 95–97%, що дозволило оперативно реагувати на зміни у процесі та запобігати втратам сировини. Наприклад, за перевищення оптимального температурного режиму на 3–5 °C система автоматично коригувала швидкість подачі реагентів, підтримувала стабільність синтезу без втручання оператора (Netzer, 2017; Allied ..., 2022).

У результаті порівняння традиційних і автоматизованих схем керування встановлено, що цифровізовані системи забезпечують зниження загальних втрат ресурсів на понад 20%, підвищення якості продукту на 17–19% та суттєве покращення екологічних показників завдяки скороченню парникових викидів і кількості стічних вод.

Цифрові рішення порівняно в таблиці 3.

Отримані результати дозволяють стверджувати, що інтеграція інноваційних тех-

Таблиця 3
Результати впровадження цифрових технологій

Цифрове рішення	Ефект
SCADA + IoT	Енергоспоживання ↓ 18,4%, брак ↓ 23,7%
Алгоритми штучного інтелекту	Точність прогнозу 95–97%, вихід ↑ на 14%
Моніторинг температури та pH у реальному часі	Час реакції ↓ на 12–15%, $\sigma \leq 0,03$

нологій, як-от SCADA, IoT, машинне навчання і адаптивне цифрове управління, сприяє підвищенню ефективності й екологічної безпеки виробництва неорганічних речовин. Такий підхід забезпечує перехід до «розумного» виробництва, здатного до самонавчання, мінімізації втрат і адаптації до змін середовища.

Екологічний аналіз виробництва підтвердив ефективність застосування альтернативних джерел сировини, як-от вторинна переробка матеріалів, що дозволило зменшити споживання природних ресурсів і мінімізувати відходи виробництва. Окрім того, упровадження нанотехнологій сприяло створенню нових функціональних матеріалів із покращеними експлуатаційними характеристиками, які можуть бути використані у високотехнологічних галузях, зокрема в енергетиці, медицині й електроніці.

Обговорення

Отримані результати дослідження підтверджують, що поєднання сучасних методів синтезу, цифрових рішень та нанотехнологій дозволяє суттєво підвищити ефективність і екологічність виробництва неорганічних речовин. Порівняння фізико-хімічних показників синтезованих зразків засвідчило, що високотемпературна стабільність, електропровідність, механічна міцність і каталітична активність суттєво покращуються завдяки застосуванню адаптивного цифрового контролю на всіх етапах виробництва (Alshammari et al., 2023; Enemosah & Ifeanyi, 2024).

Найбільш значущим у практичному плані є те, що автоматизовані системи керування на базі SCADA та IoT-сенсорів дозволяють забезпечити високоточний моніторинг і миттєву реакцію на зміну параметрів процесу. Це не лише зменшує кількість браку, але й знижує енергетичні витрати, що є критично важливим в умовах переходу до низьковуглецевої економіки (EY, 2022; Pietrasik et al., 2024). Додатковою перева-

гою є можливість прогнозування критичних відхилень за допомогою алгоритмів машинного навчання, що значно підвищує надійність виробництва (Olawade et al., 2024).

Результати лабораторних досліджень свідчать про те, що використання наноструктурованих речовин, зокрема оксидів TiO_2 , ZnO та Fe_3O_4 , дозволяє досягти високої питомої поверхні (до $250 \text{ м}^2/\text{г}$), значної фотокаталітичної активності (до 60%) та ефективної сорбції іонів важких металів. Такі характеристики є особливо цінними для застосування у сфері екологічної інженерії, енергетики й електроніки (Barrino, 2024; Automation ..., 2024).

Узагальнення технологічних підходів засвідчило, що електрохімічні та гідрометалургійні методи є оптимальними з погляду якості продукту та можливості застосування вторинної сировини. Наприклад, вилучення понад 85% металів з відходів і досягнення чистоти 99,9% в умовах низькотемпературного синтезу підтверджують конкурентоспроможність цих методів на ринку сучасних матеріалів (Netzer, 2017; Farhan & Aziz, 2024).

Загалом, інтеграція інновацій у виробничі процеси не лише забезпечує підвищення продуктивності, але й відповідає глобальним вимогам сталого розвитку, які передбачають мінімізацію використання природних ресурсів, зниження впливу на довкілля та економічну доцільність упровадження нових технологій.

Однак варто зазначити, що повномасштабне впровадження цифрових і нанотехнологій у промислове виробництво потребує значних інвестицій, висококваліфікованих кадрів і адаптації нормативної бази. Ці аспекти мають бути враховані під час формування стратегій розвитку хімічної галузі в найближчі десятиліття (Chen et al., 2022).

Висновки

У результаті проведеного дослідження встановлено, що інноваційні технології виробництва неорганічних речовин забезпечують суттєве підвищення ефективності, якості й екологічної безпеки технологічних процесів. Інтеграція автоматизованих систем SCADA, IoT-сенсорів і алгоритмів машинного навчання дозволяє здійснювати безперервний контроль параметрів синтезу, оперативно реагувати на відхилення та оптимізувати енергоспоживання.

Кількісні показники експериментального моделювання засвідчили, що впровадження цифрових систем дозволяє зменшити енер-

госпоживання до 18,4%, знизити відсоток бракованої продукції на 23,7% і підвищити точність дозування реагентів до рівня похибки $\pm 0,5\%$. Алгоритми штучного інтелекту продемонстрували здатність прогнозувати відхилення з точністю 95–97%, що суттєво підвищує стабільність процесів.

Фізико-хімічний аналіз синтезованих матеріалів підтвердив їхню високу термічну стабільність (до 1 200°C), електропровідність (10^{-2} – 10^0 S/cm), каталітичну активність (зростання швидкості реакцій на 60–80%) та механічну міцність (>120 МПа). Найвищих характеристик вдалося досягти шляхом застосування наноструктурованих каталізаторів і використання ефективних технологій синтезу, зокрема електрохімічного та гідрометалургійного, які забезпечили чистоту до 99,9% та вилучення металів понад 85%.

Окрему увагу приділено екологічним аспектам: використання вторинної сировини дозволило скоротити споживання первинних ресурсів на 25–30% та зменшити кількість відходів виробництва на 20–25%.

Отже, поєднання цифрових інструментів, нанотехнологій і ресурсозбережувальних методів у виробництві неорганічних речовин відкриває нові можливості для підвищення ефективності хімічної промисловості, адаптації до вимог сталого розвитку та зниження антропогенного навантаження на довкілля. Перспективним напрямом подальших досліджень є створення адаптивних цифрових платформ управління на основі «цифрових двійників» хімічних реакторів і масштабування таких рішень у промислових умовах.

Список використаної літератури

- Білявська В.Б., Хом'як І.В. Динаміка рослинності долини річки Гуйва. *Біологічні дослідження – 2020 : збірник наукових праць*. Житомир, 2020. С. 382–383.
- Allied Market Research. Industrial IoT Market : Global Opportunity Analysis and Industry Forecast. 2022.
- Alshammari H., Abdulrahman A., Khan M. Advanced Nanomaterials in Catalysis. *Journal of Inorganic Chemistry*. 2023. № 15 (2). P. 203–221.
- Asare-Donkor N.K., Kpodo C., Amo-Broni R., Ankyiah F. Assessing the Influence of a Dam Reservoir on Groundwater Quality in the Asante Akyem Central District of Ghana. *Asian Research Journal of Arts & Social Sciences*. 2023. № 21 (1). P. 1–11. <https://doi.org/10.9734/arjass/2023/v21i1457SAGEJournals+2>.
- Automation Ready. Intelligent Control in Chemical Manufacturing. Industry White Paper, 2024. P. 123.
- Barrino D. Modern Inorganic Materials for Clean Technologies. *Materials Science Reports*. 2024. № 12 (1). P. 77–89.
- Chen L., Wang Y., Li X. Smart Manufacturing of Inorganic Materials Using AI Algorithms. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*. 2022. № 21 (3). P. 291–305. <https://doi.org/10.1142/S0219686722500181>.
- EY. Chemicals 4.0: Digitalizing for a Sustainable Future. 2022.
- Enemosah A., Ifeanyi O.G. SCADA in the Era of IoT: Automation, Cloud-driven Security, and Machine Learning Applications. *International Journal of Science and Research Archive*. 2024. № 13 (01). P. 3417–3435. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.13.1.1975>.
- Farhan M., Aziz O. Synthesis and Characterization of NiCoMn MOFs for Wastewater Treatment. arXiv preprint arXiv: 2406. 12892. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.12892>.
- Ghavam S., Vahdati M., Wilson I.A.G., Styring P. Sustainable Ammonia Production Processes. *Frontiers in Energy Research*. 2021. № 9. P. 580808. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.580808>.
- Netzer T. Digitization in the Chemical Industry. McKinsey & Company Report, 2017.
- Olawade D., Mensah C., Zhao Y. Machine Learning Optimization in Industrial Chemistry. *AI in Process Engineering*. 2024. № 8 (1). P. 44–59.
- Pietrasik R., Kaleta T., Grzelak J. SCADA Systems in Chemical Engineering. *Automation and Control Journal*. 2024. № 32 (3). P. 301–318.

References

- Biliavska, V.B., & Khomiak, I.V. (2020). Dynamika roslыnnosti dolyny richky Huiva [Vegetation dynamics of the Guiva River valley]. *Zbirnyk naukovykh prats "Biologichni doslidzhennia – 2020" [Collection of scientific works "Biological research – 2020"]*. Zhytomyr, pp. 382–383 [in Ukrainian].

- Allied Market Research (2022). Industrial IoT Market: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast [in English].
- Alshammari, H., Abdulrahman, A., & Khan, M. (2023). Advanced nanomaterials in catalysis. *Journal of Inorganic Chemistry*, 15 (2), 203–221 [in English].
- Asare-Donkor, N.K., Kpodo, C., Amo-Broni, R., & Ankyiah, F. (2023). Assessing the influence of a dam reservoir on groundwater quality in the Asante Akyem Central District of Ghana. *Asian Research Journal of Arts & Social Sciences*, 21 (1), 1–11. <https://doi.org/10.9734/arjass/2023/v21i1457> [in English].
- Automation Ready (2024). Intelligent Control in Chemical Manufacturing. Industry White Paper [in English].
- Barrino, D. (2024). Modern inorganic materials for clean technologies. *Materials Science Reports*, 12 (1), 77–89 [in English].
- Chen, L., Wang, Y., & Li, X. (2022). Smart manufacturing of inorganic materials using AI algorithms. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 21 (3), 291–305. <https://doi.org/10.1142/S0219686722500181> [in English].
- EY. (2022). Chemicals 4.0: Digitalizing for a Sustainable Future [in English].
- Enemosah, A., & Ifeanyi, O.G. (2024). SCADA in the era of IoT: Automation, cloud-driven security, and machine learning applications. *International Journal of Science and Research Archive*, 13(01), 3417–3435. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.13.1.1975> [in English].
- Farhan, M., & Aziz, O. (2024). Synthesis and characterization of NiCoMn MOFs for wastewater treatment. arXiv preprint arXiv: 2406. 12892. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.12892> [in English].
- Netzer, T. (2017). Digitization in the Chemical Industry. McKinsey & Company Report [in English].
- Olawade, D., Mensah, C., & Zhao, Y. (2024). Machine learning optimization in industrial chemistry. *AI in Process Engineering*, 8 (1), 44–59 [in English].
- Pietrasik, R., Kaleta, T., & Grzelak, J. (2024). SCADA systems in chemical engineering. *Automation and Control Journal*, 32 (3), 301–318 [in English].

Отримано: 22.04.2025
Прийнято: 15.05.2025



Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 12
Український журнал природничих наук
№ 12

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

УДК 544.7; 546.3; 549.5
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.13>

КИСЛОТНО-ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНІ НАНОРОЗМІРНОГО Fe_3O_4

Н. В. Кусяк¹, К. П. Свиридюк², О. Ю. Кичкирук³, В. В. Листван⁴, П. П. Горбик⁵

Нанорозмірний магнетит широко використовується для створення магніточутливих нанокомпозитів біологічного та медичного призначення. Низька токсичність і можливість функціоналізації поверхні роблять його унікальним об'єктом для досліджень.

Нанорозмірний магнетит (Fe_3O_4) синтезовано золь-гель методом, як прекурсори використано хлориди Fe(II) і Fe(III) та 25% розчин аміаку. Морфологічні характеристики наночастинок магнетиту (МНЧ) визначали методом електронної мікроскопії (JEOL 1200 EX із вольфрамовою ниткою (прискорювальна напруга – 120 кВ). Відповідно до одержаних даних, наночастинок магнетиту мають сферичну форму із середнім діаметром $6,76 \pm 1,54$ нм без значної агрегації.

Рентгеноструктурні дослідження проведені методом порошкової рентгенівської дифракції (DRON-UM1 із Fe-фільтром $\text{CuK}\alpha$ -випромінювання, фокусування Бреґга – Брентано, у діапазоні 2θ 20–60° із кроком 0,1°, експозиція 1 с.). На дифрактограмах спостерігаються рефлекси

¹кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії

(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир;
Інститут хімії поверхні імені О.О. Чуйка Національної академії наук України, м. Київ)
e-mail: nkusyak@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0143-3399

² магістр,

асистент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: sviridyuk-97@ukr.net
ORCID: 0009-0000-1258-7644

³ кандидат хімічних наук,

доцент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: panova_o_yu@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0558-1647

⁴ кандидат хімічних наук,

доцент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: listvan@ukr.net
ORCID: 0000-0002-8366-2813

⁵ доктор фізико-математичних наук, професор,

завідувач відділу наноматеріалів
(Інститут хімії поверхні імені О.О. Чуйка Національної академії наук України, м. Київ)
e-mail: phorbyk@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0533-4427

(за $2\theta = 30,1; 35,6; 44; 53,3; 57,4; 62,8$ із міжплощинними відстанями $2,96; 2,52; 2,05; 1,71; 1,60; 1,47$), що відповідають кристалічній фазі магнетиту. Методом рН-метрії досліджено кислотно-основні властивості поверхні: значення рН ізоелектричного стану поверхні ($pH_{\text{ІЕТ}}$), сумарну концентрацію та значення K_i і pK поверхневих гідроксильних груп, активних у діапазоні рН 4–9, і розраховані залежності частки гідроксильних груп поверхні від рН середовища в $0,015\text{ M}$ розчині NaCl . Встановлено, що для наночастинок синтезованих зразків переважають нейтральні гідроксильні групи, що дає можливість утворювати центри як кислотного, так і основного типу. Так, для Fe_3O_4 до рН = 6 активні основні центри ($C = 155,56 \cdot 10^{-5} \text{ моль} \cdot \text{г}^{-1}$), сила яких зменшується зі зниженням рН ($pK = 2,65 - 4,48$). Кислотні центри в дуже малій кількості ($4,93 \cdot 10^{-6} \text{ моль} \cdot \text{г}^{-1}$) фіксуються в діапазоні рН 6,5–9 і проявляють слабкокислі властивості ($pK = 10,95 - 11,24$).

Ключові слова: магнетит, гідроксильна група, кислотно-основні властивості, гідролітична адсорбція.

ACID-BASE PROPERTIES OF THE SURFACE OF NANOSCALE Fe_3O_4

N. V. Kusiak, K. P. Svyrydiuk, O. Y. Kychkyruk, V. V. Lystvan, P. P. Gorbyk

Nanosized magnetite is widely used to create magnetically sensitive nanocomposites for biological and medical applications. Its low toxicity and the possibility of surface functionalization make it a unique object for research. Nanosized magnetite (Fe_3O_4) was synthesized by the sol-gel method, using Fe(II) and Fe(III) chlorides and 25% ammonia solution as precursors. The morphological characteristics of magnetite nanoparticles (MNPs) were determined by electron microscopy (JEOL 1200 EX with a tungsten filament (accelerating voltage 120 kV). According to the obtained data, MNPs have a spherical shape with an average diameter of $6,76 \pm 1,54 \text{ nm}$ without significant aggregation. X-ray structural studies were carried out by powder X-ray diffraction (DRON-UM1 with Fe filter CuK α -radiation, Bragg-Brentano focusing, in the range 2θ 20–60° with a step of 0,1°, exposure 1 s.). The diffraction patterns show reflections (at $2\theta = 30,1; 35,6; 44; 53,3; 57,4; 62,8$ with interplanar distances $2,96; 2,52; 2,05; 1,71; 1,60; 1,47$), which correspond to the crystalline phase of magnetite.

The acid-base properties of the surface were investigated by pH-metry: the pH value of the surface isoelectric state ($pH_{\text{ІЕТ}}$), the total concentration and the K_i and pK values of surface hydroxyl groups active in the pH range 4–9, and the dependences of the proportion of surface hydroxyl groups on the pH of the medium in a $0,015\text{ M}$ NaCl solution were calculated. It was found that for nanoparticles of synthesized samples, neutral hydroxyl groups prevail, which makes it possible to form centers of both acidic and basic types. Thus, for Fe_3O_4 up to pH = 6, basic centers ($C = 155,56 \cdot 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{g}^{-1}$) are active, the strength of which decreases with decreasing pH ($pK = 2,65 - 4,48$). Acid centers in a very small amount ($4,93 \cdot 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{g}^{-1}$) are fixed in the pH range 6,5–9 and exhibit weakly acidic properties ($pK = 10,95 - 11,24$).

Key words: magnetite, hydroxyl group, acid-base properties, hydrolytic adsorption.

Вступ

Наночастинки оксиду заліза, зокрема магнетиту, широко використовуються для створення магніточутливих наноконструкцій біологічного та медичного призначення завдяки своїм унікальним властивостям (невеликому розміру, низькій токсичності, магнетизму та здатності до хімічного модифікування поверхні різними біосумісними хімічними речовинами та біохімічними структурами) (Albukhaty et al., 2024). Можливість їх використання визначається складом і структурою як усього композиту, так і характеристиками поверхні, зокрема кислотно-основними (Yew et al., 2020; Abramov et al., 2016).

Дослідження впливу електронних і катіонних вакансій на різні типи структур

поверхні магнетиту розкривають хімічну природу процесів на поверхні (Noh et al., 2015). Це дозволяє пояснити протолітичні та депротолітичні властивості поверхні магнетиту та композитів на його основі, зокрема якісні та кількісні характеристики активних центрів, що є важливою передумовою розуміння природи іммобілізаційної активності поверхні наночастинок для реагентів різної природи (Parks, 1965; Cristiano et al., 2011; Kosmowski, 2016). Одним з ефективних методів оцінювання активних центрів є метод рН-метрії (Nagarajan & Venkatanarasimhan, 2020).

Матеріал і методи

Для одержання монодисперсного нанорозмірного магнетиту за реакцією Елмора (Gorbyk et al., 2012) використано «м'який»

синтез стехіометричного $\text{FeO}_2\text{Fe}_2\text{O}_3$, а саме в результаті рівномірного додавання розчину солей Fe(II) і Fe(III) до 25% розчину аміаку. Цей метод забезпечує максимальний вихід продукту.

Форму та розмір одержаних наночастинок магнетиту (далі – МНЧ) визначали методом електронної мікроскопії з використанням трансмісійного електронного мікроскопа “JEOL 1200 EX” (Токіо, Японія) з вольфрамовою ниткою (прискорювальна напруга у 120 кВ). Зразки дисперсій НЧ розводили в дейонізованій воді, поміщали на мідну сітку з вуглецевим покриттям (ЕМ Resolutions Ltd) і сушили за кімнатної температури протягом 12 годин (рис. 1, 2). Рентгеноструктурні дослідження проводили методом порошкової рентгєнівської дифракції (XRD) за допомогою приладу “DRON-UM1” з Fe-фільтром $\text{CuK}\alpha$ -випромінювання, фокусування Бреґґа – Брєнтано, у діапазоні 2θ 20–60° із кроком 0,1°, експозиція 1 с.

Кислотно-основні властивості поверхні зразків досліджували методом рН-метрії окремих зразків, що дозволяє оцінити інтегральну кислотність поверхні в дослідженні зміни рН водної суспензії досліджуваних зразків. У конічні колби вносили 0,1 г проби, додавали по 20 мл розчину електроліту. Як індиферентний електроліт використовували 0,015 М розчин NaCl з різним рН ($\text{pH}_0 = 4\text{--}9$ з інтервалом 0,5 од. встановлювали шляхом додавання 0,01 М розчинів NaOH і HCl). Суспензії перемішували на шейкері протягом двох годин. Розчин відокремлювали від зразка декантацією на постійному магніті та вимірювали рН (pH_{eq}).

Результати

Відповідно до одержаних даних (рис. 1-а), МНЧ мають сферичну форму із середнім

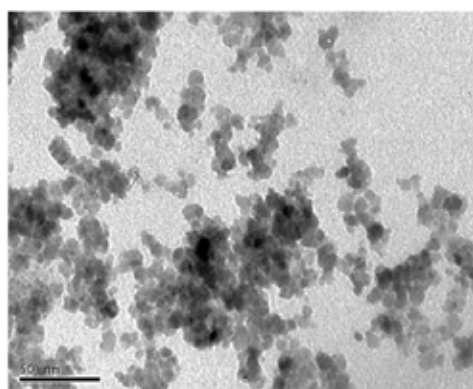
діаметром $6,76 \pm 1,54$ нм (рис. 1-б) без значної агрегації.

Для підтвердження кристалічної структури магнетиту синтезовані зразки були проаналізовані методом порошкової рентгєнівської дифракції (XRD) (рис. 2). На дифрактограмах магнетиту спостерігаються рефлекси (за $2\theta = 30,1; 35,6; 44; 53,3; 57,4; 62,8$ із міжплощинними відстанями 2,96; 2,52; 2,05; 1,71; 1,60; 1,47), що відповідають кристалічній фазі магнетиту.

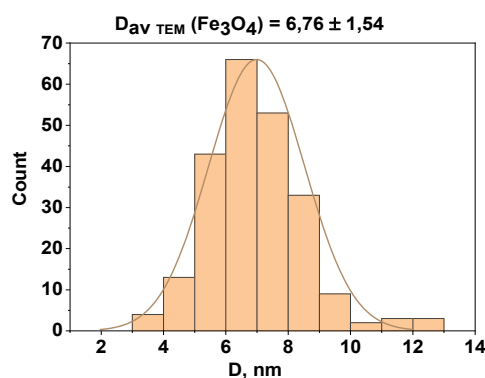
Зміна рН водної суспензії, отже, і поверхневого заряду оксидів металів у суспензіях відбувається завдяки процесам адсорбції за участю іонів H^+ і OH^- , дисоціації поверхневих гідроксильних груп ($=\text{E-OH}$), а також дисоціації молекул води за гетеролітичним механізмом. У результаті проведеного аналізу залежностей гідролітичної адсорбції можна дійти висновку про природу кислотно-основного характеру поверхневих груп (Kosmulski, 2016).

Різниця у значеннях кислотності розчинів до (pH_0) і після (pH_{eq}) гідролітичної адсорбції показує зміну (ΔpH) у результаті $\Delta\text{pH} = \text{pH}_0 - \text{pH}_{\text{eq}}$. Побудовано графіки залежності $\Delta\text{pH} = f(\text{pH}_0)$. Оскільки загалом в іонному обміні, окрім H^+ і OH^- , беруть участь інші іони, значення рН, за якому спостерігається рівність адсорбції іонів H^+ і OH^- , визначається як ізоелектрична точка pH_{IET} , яка є важливою характеристикою кислотно-основних властивостей поверхні. Точка перетину прямої $\Delta\text{pH} = a\Delta\text{pH}_0 + b$ із віссю pH_0 вказує на значення ізоелектричної точки, тангенс кута нахилу – на характеристику обмінної ємності поверхневих груп.

Визначення інтегральних показників кислотно-основних властивостей суспензій базується на розрахунку констант іоні-



а



б

Рис. 1. ТЕМ зображення МНЧ (масштаб – 50 нм) (а); гранулометричний склад (б)

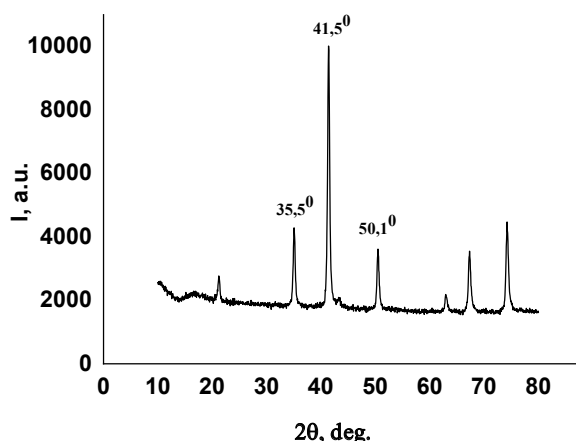
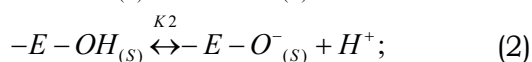
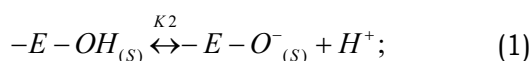


Рис. 2. Дифрактограма синтезованого зразка МНЧ

зації поверхневих гідроксильних груп K_1 і K_2 , які характеризують такі поверхневі рівноваги:



$-E-OH^+_{2(s)}$ – група на поверхні, яка вини-

кає внаслідок адсорбції H^+ із рідкої фази;

$-E-OH_{(s)}$ – нейтральна гідроксильна

група на поверхні;

$-E-O^-_{(s)}$ – група на поверхні, яка вини-

кає внаслідок дисоціації OH -групи та пере-

ходу H^+ у рідку фазу;

$-H^+$ – протони у фазі суспензії;

K_1 і K_2 – константи іонізації (кількісна характеристика кислотності й основності поверхневих груп).

Виходячи з рівнянь 1 та 2, розраховують значення ΔpH_i . За допомогою значень для K_1 і K_2 отримуємо вираз:

$$K_1 = \frac{[H^+] \cdot [-E-OH_{(s)}]}{[-E-OH^+_{2(s)}]}; \quad (3)$$

$$K_2 = \frac{[H^+] \cdot [-E-O^-_{(s)}]}{[-E-OH_{(s)}]}; \quad (4)$$

Зміна $[H^+]$ у суспензії визначається рівнянням:

$$\Delta[H^+] = [H^+]_0 - [H^+]_{eq}, \quad (5)$$

де $[H^+]_{eq}$ – рівноважна концентрація протонів у суспензії, $[H^+]_0$ – концентрація прото-

нів у вихідному розчині; $\Delta[H^+]$ – відповідна різниця концентрацій протонів.

$$\Delta[H^+] = \Delta[H^+]_1 + \Delta[H^+]_2 = ([-E-OH^+_{2(s)}]_0 -$$

$$[-E-OH^+_{2(s)}]_{eq}) + ([-E-O^-]_0 - [-E-O^-]_{eq}), \quad (6)$$

де $\Delta[H^+]_1$ – зміна концентрації H^+ , пов'язана з поверхневими групами $-E-OH^+_{2(s)}$;

$\Delta[H^+]_2$ – зміна концентрації H^+ , пов'язана з поверхневими групами $-E-O_{(s)}$;

$[-E-OH^+_{2(s)}]_0$ і $[-E-O^-]_0$ – концентрації протонізованих і депротонізованих поверхневих груп, що характеризують вихідний стан поверхні;

$[-E-OH^+_{2(s)}]_{eq}$ і $[-E-O^-]_{eq}$ – концентрації протонізованих і депротонізованих поверхневих груп, що характеризують рівноважний стан поверхні.

Розраховано значення іонної сили та коефіцієнт активності, які були використані для розрахунків. З використанням рівняння (6) і розрахованих за експериментальними даними значень $\Delta[H^+]_1$ і $\Delta[H^+]_2$ для кожного зі значень рН визначаються $[-E-OH^+_{2(s)}]$ і $[-E-O^-]$ – концентрації протонізованих і депротонізованих поверхневих груп.

Загальна концентрація поверхневих гідроксильних груп (C_s) визначається як:

$$C_s = [-E-OH] + [-E-O^-] + [E-OH^+_{2(s)}]. \quad (7)$$

Рівняння (3, 4, 7) використовуються для визначення частки негативно (α^-)- $E-O^-_{(s)}$, позитивно (α^+)- $E-O^-_{(s)}$ заряджених і нейтральних (α^0)- $E-OH_{(s)}$ груп у діапазоні рН, що досліджується:

$$\alpha^- = \frac{K_1 \cdot K_2}{[H^+] \cdot K_1 + K_1 \cdot K_2 + [H^+]^2}; \quad (8)$$

$$\alpha^+ = \frac{[H^+]^2}{[H^+] \cdot K_1 + K_1 \cdot K_2 + [H^+]^2}; \quad (9)$$

$$\alpha^0 = \frac{K_1 \cdot [H^+]}{[H^+] \cdot K_1 + K_1 \cdot K_2 + [H^+]^2}; \quad (10)$$

За результатами розрахунків побудовано діаграму залежності часток поверхневих груп поверхні Fe_3O_4 від рН середовища.

Виходячи з рівнянь 8–10 і 6 розраховують значення α_0^+ і α_0^- , які теоретично оцінюють внесок позитивно і негативно заряджених груп у взаємодію з водним розчином за різних значень рН:

$$\Delta[H^+]_a = C_s \cdot \left(\alpha_0^+ - \frac{[H^+]^2}{[H^+] \cdot K_1 + K_1 \cdot K_2 + [H^+]^2} \right); \quad (11)$$

$$\Delta[H^+]_b = C_s \cdot \left(\alpha_0^- + \frac{K_1 \cdot K_2}{[H^+] \cdot K_1 + K_1 \cdot K_2 + [H^+]^2} \right). \quad (12)$$

Узагальненою характеристикою заряду поверхні є точка нульового заряду

(Kosmulski, 2016). У разі однакової концентрації іонізованих груп $[-E-OH_2^+]$ і $[-E-O^-]$ поверхня стає нейтральною, що відповідає точці нульового заряду ($\sigma = 0$). pH_0 середовища визначають з умови, що $[H^+]^2 = K_1 K_2$. Тоді:

$$pH_0 = 0,5(pK_1 + pK_2). \quad (13)$$

Результати трьох паралельних вимірювань обробляються методами математичної статистики (Brown & Ekberg, 2016), похибка точності прямого вимірювання не перевищила 2,5%. Оцінювання похибки результатів вимірювань виконується з урахуванням значень точності вимірювальних приладів, аналізу експериментальних похибок. Порівняння результатів із літературними даними свідчить про достовірність даних, отриманих у цій роботі.

За експериментальними значеннями (pH_0) та (pH_{eq}), які були отримані під час гідролітичної адсорбції в розчинах різної іонної сили, розраховано зміну ($\pm \Delta pH$) та побудовано графіки залежності $\pm \Delta pH = f(pH_0)$.

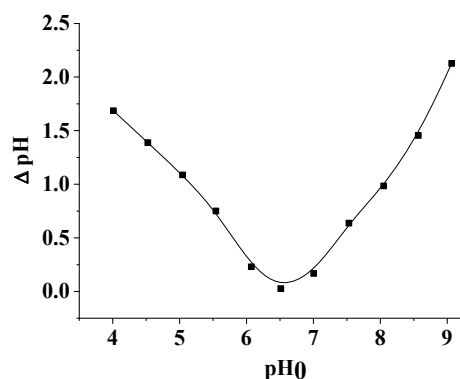
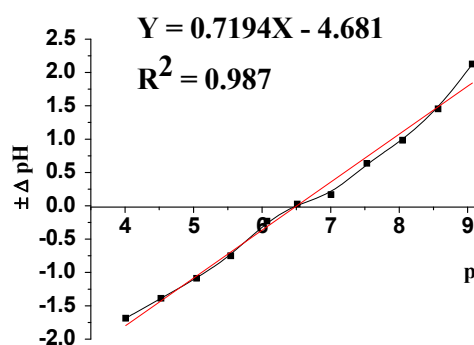


Рис. 3. Залежність $\pm \Delta pH$ від pH_0 (а) та крива гідролітичної адсорбції (б) для поверхні Fe_3O_4 (середовище – 0,015 М розчин NaCl)

Таблиця 1

Залежність концентрації протонізованих $-E-OH_2^+$ і депротонізованих $-E-O^-$ гідроксильних груп поверхні Fe_3O_4 (0,015 М розчин NaCl) від рН розчину

pH	$[-E-OH_2^+] \cdot 10^{-5} \pm X \cdot 10^{-5} \text{ моль} \cdot \text{г}^{-1}$	pH	$[-E-O^-] \cdot 10^{-7} \pm X \cdot 10^{-8} \text{ моль} \cdot \text{г}^{-1}$
4,01	$110,0 \pm 3,32$	6,51	$2,17 \pm 0,55$
4,52	$32,9 \pm 1,75$	7,01	$5,36 \pm 1,29$
5,04	$9,54 \pm 0,38$	7,53	$11,31 \pm 3,78$
5,54	$2,71 \pm 0,04$	8,05	$8,85 \pm 17,56$
6,07	$0,40 \pm 0,01$	8,56	$8,55 \pm 13,31$
6,51		9,06	$13,09 \pm 26,02$
$\Sigma ([-E-OH_2^+] \cdot 10^{-5} \pm X \cdot 10^{-5} \text{ моль} \cdot \text{г}^{-1})$		$\Sigma ([-E-O^-] \cdot 10^{-7} \pm X \cdot 10^{-8} \text{ моль} \cdot \text{г}^{-1})$	
	$155,6 \pm 1,10$		$49,3 \pm 10,42$

Визначено значення $pH_{\text{ІЕТ}}$ поверхні Fe_3O_4 в середовищі 0,015 М розчину NaCl (рис. 3).

За результатами аналізу (рис. 3-а) $pH_{\text{ІЕТ}} = 6,5-6,8$ форма кривої гідролітичної адсорбції відповідає наявності на поверхні Fe_3O_4 різних типів кислотно-основних активних центрів. За значення $pH < pH_{\text{ІЕТ}}$ відбуваються процеси гідролітичної адсорбції за участю основних центрів (поверхня набуває позитивного заряду завдяки адсорбції катіона H^+), що зумовлено здатністю до протонування поверхневих гідроксильних груп: $(-E-OH^0 + H^+ \rightarrow -OH_2^+)$.

За значення $pH > pH_{\text{ІЕТ}}$ процеси гідролітичної адсорбції протікають за участю кислотних центрів (поверхня має негативний заряд), це зумовлено здатністю до депротонування поверхневих гідроксильних груп: $(-E-OH_2^+ + OH^- \rightarrow -E-O^- + H_2O)$.

Були експериментально отримані значення $[H]_0$ і $[H]_{\text{eq}}$, а зміни ΔaH і $\Delta[H^+]$ розраховували для отримання концентрацій протонуваних $-E-OH_2^+$ і депротонуваних $-E-O^-$ гідроксильних груп поверхні. У таблиці 1 наведені значення сумарної концентрації поверхневих гідроксильних груп Fe_3O_4 за різних pH , одержані відповідно до рівнянь (6) та значення (7).

Сс у цьому діапазоні значень pH розрахований за експериментальними даними – $1,56 \text{ ммоль} \cdot \text{г}^{-1}$, що задовільно узгоджується з результатами термогравіметричних досліджень ($1,8 \text{ ммоль} \cdot \text{г}^{-1}$) Fe_3O_4 (Gorbyk et al., 2012).

З використанням (3, 4) експериментально отриманих і розрахованих значень обчислили значення K_1 і K_2 і відповідні їм значення pK_1 і pK_2 для різних pH (табл. 2). Виходячи із рівнянь (3, 4, 7), розраховували частки негативно (α^-), позитивно (α^+) заряджених і нейтральних (α^0) груп у діапазоні pH (рис. 4).

Таблиця 2

Значення pK гідроксильних груп поверхні Fe_3O_4 (0,015 М розчину NaCl) залежно від pH

pH	$E-OH_2^+$	pH	$-E-O^-$
	pK_1		pK_2
4,01	$4,48 \pm 0,01$	6,51	$11,28 \pm 0,03$
4,52	$4,17 \pm 0,02$	7,01	$11,24 \pm 0,03$
5,04	$3,85 \pm 0,01$	7,53	$10,97 \pm 0,04$
5,54	$3,47 \pm 0,01$	8,05	$11,25 \pm 0,22$
6,07	$2,65 \pm 0,01$	8,56	$11,31 \pm 0,18$
6,51		9,07	$10,95 \pm 0,21$

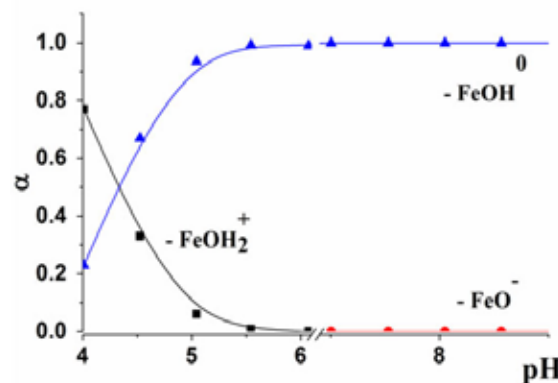


Рис. 4. Залежність частки нейтральних (α^0) негативно (α^-) та позитивно (α^+) заряджених груп на поверхні Fe_3O_4 від pH середовища (0,015 М розчин NaCl)

Теоретичний розрахунок значень α_0^+ і α_0^- за допомогою рівнянь (6, 8–10) дозволяє теоретично оцінити внесок позитивно і негативно заряджених груп у взаємодії з водним розчином за різних значень pH (табл. 3).

Таблиця 3

Теоретична частка негативно α^- і позитивно α^+ заряджених груп поверхні Fe_3O_4 залежно від pH розчину (0,015 М розчин NaCl)

pH	α_0^+	pH	α_0^-
4,01	0,84	6,51	$1,39 \cdot 10^{-5}$
4,52	0,35	7,01	$3,44 \cdot 10^{-5}$
5,04	0,07	7,53	$7,25 \cdot 10^{-5}$
5,54	$9,71 \cdot 10^{-3}$	8,05	$5,67 \cdot 10^{-5}$
6,07	$4,35 \cdot 10^{-4}$	8,56	$5,48 \cdot 10^{-5}$
6,51		9,06	$8,39 \cdot 10^{-5}$

У діапазоні розрахункових значень pK (2,59–11,94) активні центри належать до протонного типу: $-OH$ – поверхневі групи різної кислотно-основної сили. Молекули води по-різному протонувани та координувани з основними (двоелектронні орбіталі атома O ($E-O^{1-}$)) та кислотними (вакантні орбіталі атомів Fe) апротонними центрами.

Згідно з результатами досліджень, на поверхні Fe_3O_4 переважають нейтральні центри, які однаково характеризуються як кислотними, так і основними властивостями, що дає змогу утворювати центри кислотного й основного типів у діапазоні pH 4–9 з максимальною часткою після pH 6 (див. рис. 4).

У діапазоні рН 4–6 активні основні центри ($C = 155,56 \cdot 10^{-5} \pm 1,10$ моль $\cdot$ г $^{-1}$), сила яких зменшується зі зниженням рН ($pK = 2,65 \pm 0,01$ – $4,48 \pm 0,01$). Кислотні центри в дуже малій кількості ($4,93 \cdot 10^{-6} \pm 10,42 \cdot 10^{-7}$ моль $\cdot$ г $^{-1}$) фіксуються в діапазоні рН 6,5–9 і проявляють слабкі кислотні властивості ($pK = 10,95 \pm 0,21$ – $11,24 \pm 0,03$).

За значеннями K_1 , K_2 і $[H^+]$ були розраховані a^+ , a^- , a^0 . У досліджуваному діапазоні рН частка позитивно заряджених груп EOH_2^+ на поверхні Fe_3O_4 зменшується зі збільшенням рН, найбільше значення – 0,84 за рН 4,01, зменшується за рН 4,52. Частка негативно заряджених груп $-EO^-$ на поверхні фіксується після рН 6,5 у дуже малих кількостях: $1,39 \cdot 10^{-6}$ – $8,84 \cdot 10^{-7}$. Частка теоретично розрахованих позитивно і негативно заряджених центрів більша, ніж експериментально одержаних, оскільки нейтральні групи залежно від рН середовища беруть участь у процесах протонування або депротонування.

Висновки

Синтезовано нанорозмірний магнетит (Fe_3O_4). Методом рН метрії досліджено кислотно-основні властивості поверхні: значення рН ізоелектричного стану поверхні (pH_{IEP}), сумарну концентрацію та значення K_1 і pK поверхневих гідроксильних груп, активних у діапазоні рН 4–9, і розраховані залежності частки гідроксильних груп поверхні від рН середовища в 0,015М розчині NaCl. Встановлено, що для наночастинок синтезованих зразків переважають нейтральні гідроксильні групи, що дає можливість утворювати центри як кислотного, так і основного типу. Так, для Fe_3O_4 до рН = 6 активні основні центри ($C = 155,56 \cdot 10^{-5}$ моль $\cdot$ г $^{-1}$), сила яких зменшується зі зниженням рН ($pK = 2,65$ – $4,48$). Кислотні центри в дуже малій кількості ($49,3 \cdot 10^{-7}$ моль $\cdot$ г $^{-1}$) фіксуються в діапазоні рН 6,5–9 і проявляють слабкі кислотні властивості ($pK = 10,95$ – $11,24$).

Список використаної літератури

- Abramov N.V., Turanska S.P., Kussyak A.P., Petranovska A.L., Gorbyk P.P. Synthesis and properties of magnetite/hydroxyapatite/doxorubicin nanocomposites and magnetic liquids based on them. *Journal of Nanostructure in Chemistry*. 2016. Vol. 6. P. 223–233. <https://doi.org/10.1007/s40097-016-0196-z>.
- Albukhaty S., Sulaiman G.M., Al-Karagoly H., Mohammed H.A., Hassan A.S., Alshammari A., Ahmad A.M., Madhi R., Almalki F.A., Khashan K.S., Jabir M.S., Yusuf M., Al-aqbi Z.T., Sasikumar P., Khan R.A. Iron oxide nanoparticles: The versatility of the magnetic and functionalized nanomaterials in targeting drugs, and gene deliveries with effectual magnetofection. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2024. Vol. 99. P. 105838. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2024.105838>.
- Brown P.L., Ekberg C. Hydrolysis of Metal Ions. Weinheim : Wiley-VCH, 2016. 952 p.
- Cristiano E., Hu Y.J., Sigfried M., Kaplan D., Nitsche H. A Comparison of Point of Zero Charge Measurement Methodology. *Clays and Clay Minerals*. 2011. Vol. 59. № 2. P. 107–115. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2011.0590201>.
- Gorbyk P.P., Petanovskaya A.L., Turelik M.P., Abramov M.V., Vasilieva O.A. Certificate 46056 TTR (temporary technological regulation) on the for the production of the substance “Magnetite”. 2012.
- Kosmulski M. Isoelectric points and points of zero charge of metal (hydr)oxides: 50 years after Parks’ review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2016. Vol. 238. P. 1–61. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.10.005>.
- Nagarajan D., Venkatanarasimhan S. Kinetics and mechanism of efficient removal of Cu(II) ions from aqueous solutions using ethylenediamine functionalized cellulose sponge. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. Vol. 148. P. 988–998. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.177>.
- Noh J., Osman O.I., Aziz S.G., Winget P., Brédas J.-L. Magnetite Fe_3O_4 (111) Surfaces: Impact of Defects on Structure, Stability, and Electronic Properties. *Chemistry of Materials*. 2015. Vol. 27. № 17. P. 5856–5867. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5b02885>.
- Parks G.A. The Isoelectric Points of Solid Oxides, Solid Hydroxides, and Aqueous Hydroxo Complex Systems. *Chemical Reviews*. 1965. Vol. 65. № 2. P. 177–198. <https://doi.org/10.1021/cr60234a002>.

Yew Y., Shameli K., Miyake M., Khairudin N., Mohamad S., Naiki T., Lee K. Green biosynthesis of superparamagnetic magnetite Fe_3O_4 nanoparticles and biomedical applications in targeted anticancer drug delivery system. *Arabian Journal of Chemistry*. 2020. Vol. 13. № 1. P. 2287–2308. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.04.013>.

References

- Abramov, N.V., Turanska, S.P. Kusyak, A.P., Petranovska, A.L., & Gorbyk, P.P. (2016). Synthesis and properties of magnetite/hydroxyapatite/doxorubicin nanocomposites and magnetic liquids based on them. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 6, 223–233. <https://doi.org/10.1007/s40097-016-0196-z> [in English].
- Albukhaty, S., Sulaiman, G.M., Al-Karagoly, H., Mohammed, H.A., Hassan, A.S., Alshammari, A., Ahmad, A.M., Madhi, R., Almalki, F.A., Khashan, K.S., Jabir, M.S., Yusuf, M., Al-aqbi, Z.T., Sasikumar, P., & Khan, R.A. (2024). Iron oxide nanoparticles: The versatility of the magnetic and functionalized nanomaterials in targeting drugs, and gene deliveries with effectual magnetofection. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 99, 105838. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2024.105838> [in English].
- Brown, P.L., & Ekberg, C. (2016). Hydrolysis of Metal Ions. Weinheim: Wiley-VCH [in English].
- Cristiano, E., Hu, Y.J., Sigfried, M., Kaplan, D., & Nitsche, H.A (2011). Comparison of Point of Zero Charge Measurement Methodology. *Clays and Clay Minerals*, 59 (2), 107–115. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2011.0590201> [in English].
- Gorbyk, P.P., Petanovskaya, A.L., Turelik, M.P., Abramov, M.V., & Vasilieva, O.A. (2012). Certificate 46056 TTR (temporary technological regulation) on the for the production of the substance “Magnetite” [in Ukrainian].
- Kosmulski, M. (2016). Isoelectric points and points of zero charge of metal (hydr) oxides: 50 years after Parks’ review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 238, 1–61. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.10.005> [in English].
- Nagarajan, D., & Venkatanarasimhan, S. (2020). Kinetics and mechanism of efficient removal of Cu (II) ions from aqueous solutions using ethylenediamine functionalized cellulose sponge. *International Journal of Biological Macromolecules*, 148, 988–998. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.177> [in English].
- Noh, J., Osman, O.I., Aziz, S.G., Winget, P., & Brédas, J.-L. (2015). Magnetite Fe_3O_4 (111) Surfaces: Impact of Defects on Structure, Stability, and Electronic Properties. *Chemistry of Materials*, 27 (17), 5856–5867. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5b02885> [in English].
- Parks, G.A. (1965). The Isoelectric Points of Solid Oxides, Solid Hydroxides, and Aqueous Hydroxo Complex Systems. *Chemical Reviews*, 65 (2), 177–198. <https://doi.org/10.1021/cr60234a002> [in English].
- Yew, Y., Shameli, K., Miyake, M., Khairudin, N., Mohamad, S., Naik, T., & Lee, K. (2020). Green biosynthesis of superparamagnetic magnetite Fe_3O_4 nanoparticles and biomedical applications in targeted anticancer drug delivery system. *Arabian Journal of Chemistry*, 13 (1), 2287–2308. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.04.013> [in English].

Отримано: 22.04.2025

Прийнято: 15.05.2025



УДК 620.197.3:544.362

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.14>

ВПЛИВ ВОДНИХ ВИЛУЧЕНЬ ІЗ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ НА АНТИКОРОЗІЙНУ СТІЙКІСТЬ МЕТАЛІВ У КИСЛОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Ю. Ю. Петруша¹, І. М. Сохрякова², В. М. Повзло³

Робота присвячена дослідженню антикорозійної стійкості металів у кислому середовищі за додавання водних вилучень із рослин, які широко розповсюджені в Запорізькому регіоні: кульбаби лікарської (*Taraxacum officinale*), соняшнику звичайного (*Helianthus annuus*) і амброзії полинолистої (*Ambrosia artemisiifolia*). Вплив водних витяжок вивчали на зразках прямокутної форми сталі Ст1пс (вуглецева конструкційна) та 30ХГСА (конструкційна легована), які широко застосовується для виготовлення металоконструкцій і деталей у різних галузях промисловості. Дослідження проводили в корозійноагресивному середовищі – 10%-ому розчині сульфатної кислоти. Швидкість процесу корозії сталевих зразків у кислому середовищі оцінювали гравіметричним методом за стандартними показниками. Отримані результати показали позитивний вплив всіх водних вилучень із рослинної сировини на сталь Ст1пс, а також позитивний вплив витяжки із соняшнику, суміші витяжок амброзії та інших двох рослин на сталь 30ХГСА в сульфатнокислому середовищі. З'ясовано вплив обробки поверхні зразків на інтенсивність процесу корозії. Торці й отвори сталевих пластин, які не були оброблені на шліфувально-карусельному верстаті та відполіровані за допомогою полірувальної бабки, виявили меншу корозійну стійкість, ніж оброблені ділянки. Вірогідно, одним із можливих механізмів дії досліджуваних водних рослинних вилучень є зниження швидкості корозії шляхом адсорбції, тобто формування захисного бар'єра на поверхні металу. На основі виконаних досліджень можна рекомендувати витяжки з кульбаби лікарської, соняшнику звичайного й амброзії полинолистої як перспективні субстанції для підвищення антикорозійної стійкості металів і створення нових «зелених» інгібіторів кислотної корозії.

Ключові слова: корозія металів, «зелені інгібітори», кислотна корозія, антикорозійна стійкість.

¹ кандидат біологічних наук,
доцент кафедри композиційних матеріалів, хімії та технологій
(Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя)
e-mail: Yulia.ZNU@ukr.net
ORCID: 0000-0003-3041-2877

² завідувач навчальної лабораторії хімічних методів дослідження
(Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя)
e-mail: irchvanova04@gmail.com
ORCID: 0009-0009-2736-0296

³ старший викладач кафедри композиційних матеріалів, хімії та технологій
(Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя)
e-mail: pan431@ukr.net
ORCID: 0000-0003-3458-9821

INFLUENCE OF WATER EXTRACTIONS FROM PLANT RAW MATERIALS ON THE CORROSION RESISTANCE OF METALS IN ACIDIC ENVIRONMENTS

Yu. Yu. Petrusha, I. M. Sokhriakova, V. M. Povzlo

*The work is devoted to the study of the corrosion resistance of metals in an acidic environment with the addition of aqueous extracts from plants that are widely distributed in the Zaporizhia region: dandelion (*Taraxacum officinale*), sunflower (*Helianthus annuus*) and ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*). The effect of water extracts was studied on rectangular samples of steel St1ps (carbon structural) and 30KhGSA (structural alloy), which are widely used for the manufacture of metal structures and parts in various industries. The research was conducted in a corrosive-aggressive environment – a 10% solution of sulfuric acid. The rate of corrosion of steel samples in an acidic environment was estimated by the gravimetric method using standard indicators. The results obtained showed a positive effect of all aqueous extracts from plant raw materials on St1ps steel. Also, a positive effect of sunflower extract, a mixture of ragweed extracts and other two plants on 30KhGSA steel in a sulfuric acid environment was revealed. The influence of surface treatment of samples on the intensity of the corrosion process was determined. The ends and holes of the steel plates showed lower corrosion resistance than the areas that were processed on a grinding and carousel machine and polished using a polishing head. Probably, one of the possible mechanisms of action of the studied aqueous plant extracts is the reduction of the corrosion rate by adsorption, i.e. the formation of a protective barrier on the metal surface. Based on the conducted studies, it is possible to recommend extracts from dandelion, sunflower and ragweed as promising substances for increasing the corrosion resistance of metals and creating new “green” inhibitors of acid corrosion.*

Key words: metal corrosion, “green inhibitors”, acid corrosion, corrosion resistance.

Вступ

Проблема захисту металів і сплавів від корозії турбує дослідників усього світу, оскільки з розвитком промислового потенціалу країн темпи зростання корозійних втрат уже перевищують темпи зростання металічного фонду. Проблема корозії має глобальний характер, тому що стосується експлуатаційно-технічної надійності та довговічності будь-якого обладнання, що містить металеві вузли, а також економічно раціонального використання матеріальних ресурсів.

Одним із методів боротьби з корозією є застосування інгібіторів корозії – речовин, які за додавання до корозійного середовища можуть уповільнити швидкість руйнування металів. Нині, з погляду екологічності та відповідно до Цілей сталого розвитку ООН від 2015 р. (п. 12), усе більший інтерес для наукової спільноти становлять «зелені» інгібітори корозії.

Застосування продуктів рослинного походження як антикорозійних засобів починається із 30-х рр. XX ст., коли *Chelidonium majus* та деякі інші рослини почали використовувати у травленні металів сульфатною кислотою. У науковій літературі 1960-х рр. повідомляється про використання дубильних речовин і їхніх похідних для захисту сталі, чавуну та деяких інших сплавів від корозії (Kumari & Lavanya,

2022). Надалі інтерес до використання природних речовин як інгібіторів корозії значно збільшився, оскільки застосування екстрактів рослин виявило багато конструктивних аспектів. «Зелені» інгібітори є легкодоступними, економічними, екологічно безпечними та відновлюваними.

Важливість «зелених» інгібіторів корозії також значно зростає з підвищенням екологічної обізнаності суспільства та появою правових обмежень, які регламентують використання синтетичних органічних інгібіторів корозії та неорганічних інгібіторів, які є токсичними для людини й навколишнього середовища (Alhaidar et al., 2024).

До «зелених» органічних інгібіторів належать рослини (екстракти, олії), амінокислоти, лікарські засоби, природні полімери. Що стосується неорганічних інгібіторів, то більшість із них є токсичними і не можуть уважатися «зеленими». Однак є й винятки. Наприклад, неорганічні сполуки з рідкоземельними елементами (солі лантанодів) виявляють низьку токсичність і хорошу здатність до біологічного розкладання, отже, належать до групи «зелених» неорганічних інгібіторів (Alhaidar et al., 2024).

Рослинні екстракти містять велику кількість складників, зокрема поліфеноли, флавоноїди, дубильні речовини, алкалоїди, полісахариди тощо. Натепер накопичено чималий науковий матеріал, переважно

закордонний, щодо вивчення протикорозійних властивостей водних і органічних витяжок із різноманітних трав або відходів рослинної сировини (Хома, 2021; Петруша та ін., 2023).

Відповідно, метою нашої роботи було дослідження антикорозійної стійкості металів у кислому середовищі за додавання водних вилучень із рослин, які широко розповсюджені в Запорізькому регіоні.

Матеріал і методи

Для аналізу протикорозійних властивостей було відібрано кульбабу лікарську (*Taraxacum officinale*), соняшник звичайний (*Helianthus annuus*), а також небезпечну карантинну рослину – амброзію полинолисту (*Ambrosia artemisiifolia*). Використовували коріння кульбаби, стебло, листя та голівку соняшнику, стебло та листя амброзії.

Для експерименту було підготовлено прямокутні зразки зі сталі Ст1пс та 30ХГСА, хімічний склад яких наведено в таблиці 1.

Сталь марки Ст1пс – конструкційна вуглецева сталь, яка використовується для виробництва прокату різного призначення, труб, рейок, заклепок, болтів тощо. Сталь марки 30ХГСА – конструкційна легувана сталь, широко застосовується для виготовлення металоконструкцій і деталей у машинобудуванні, авіабудуванні, нафтодобуванні, газовидобуванні, металургії, оборонній промисловості та комунальному господарстві.

Зразки сталей попередньо були піддані обробці на шліфувально-карусельному верстаті МСЗ та відшліфовані за допомогою полірувальної бавки до набуття поверхнею дзеркального блиску.

Наважки подрібненої рослинної сировини заливали дистильованою водою температурою 100 °С, витримували за температури 18–20 °С протягом доби. Далі витяжки проціджували для подальшого застосування. Під час дослідження отримані рослинні вилучення з'єднували у співвідношенні 1 : 1 (кульбаба – амброзія та соняшник – амброзія) та 2 : 1 (амброзія – кульбаба), а також

окремо досліджували їхню дію в активному корозійному середовищі – 10%-му розчині сульфатної кислоти.

Зразки витримували в корозійному середовищі 72 години. Вилучення з рослинних продуктів добавляли прямо в корозійне середовище. Паралельно проводили контрольні дослідження (без додавання рослинних інгібіторів).

Швидкість процесу корозії сталевих зразків у кислому середовищі оцінювали гравіметричним методом за стандартними показниками (Повзло, 2020). Для цього перед початком аналізу зразки сталі зважували на аналітичних терезах з точністю до 0,0001 г, визначали розміри зразків і розраховували площу поверхні, беручи до уваги площу отвору.

Результати

Уже на початку експерименту в контрольних розчинах візуально спостерігався корозійний процес – з'являлися бульбашки газу (водню), а сталеві пластини майже відразу набули чорного кольору. Значно менше цей процес спостерігався в розчинах із додаванням рослинних витяжок.

Після 3-х діб витримування колір експериментальних розчинів (з рослинною витяжкою) змінився та став більш насиченим. У контрольних розчинах досі активно продовжувався процес корозії (виділялись бульбашки водню).

Після завершення експерименту поверхня сталевих зразків набула матового кольору, стала шорсткою. Торці пластин і отвір також стали шорсткі й піддались роз'їданню.

Розрахунки вагового (K_m) та глибинного показників (Π) швидкості корозії, коефіцієнта гальмування швидкості корозії (γ) та ступеня інгібіторного захисту (Z) для сталі Ст1пс наведено в таблиці 2, а для сталі 30ХГСА – у таблиці 3.

Ступінь інгібіторного захисту для сталі Ст1пс перебував у межах 90–93%, а для сталі 30ХГСА мав значні коливання – 5–92%. Найкращу ефективність мала суміш амброзії та кульбаби (2 : 1).

Таблиця 1

Хімічний склад зразків сталі Ст1пс та 30ХГСА

Вміст елемента, %	Fe	C	Si	Mn	Ni	Cr	S	P
Сталь Ст1пс	99,5	0,06–0,12	0,05–0,15	0,25–0,50	до 0,30	–	до 0,05	до 0,04
Сталь 30ХГСА	до 97	0,28–0,34	0,9–1,2	0,8–1,1	до 0,03	0,8–1,1	до 0,025	до 0,025

Таблиця 2

Розрахунки показників антикорозійної стійкості сталі Ст1пс

Розчин Показник	H ₂ SO ₄	Амброзія	Кульбаба	Соняшник	Амброзія та кульбаба (1 : 1)	Амброзія та кульбаба (2 : 1)	Амброзія та соняшник (1 : 1)
K _m	6,91	0,61	0,64	0,59	0,56	0,46	0,72
γ		11,34	10,86	11,69	12,40	15,12	9,56
Z, %		91	91	91	92	93	90
П, (мм/рік)	7,71	0,68	0,71	0,66	0,62	0,51	0,81

Таблиця 3

Розрахунки показників антикорозійної стійкості сталі 30ХГСА

Розчин Показник	H ₂ SO ₄	Амброзія	Кульбаба	Соняшник	Амброзія та кульбаба (1 : 1)	Амброзія та кульбаба (2 : 1)	Амброзія та соняшник (1 : 1)
K _m	38,22	27,69	36,48	13,15	10,45	2,89	12,92
γ		1,38	1,05	2,91	3,66	13,20	2,96
Z, %		28	5	66	73	92	66
П, (мм/рік)	42,65	30,90	40,70	14,68	11,66	3,23	14,42

Глибинний показник швидкості корозії контрольних зразків сталі Ст1пс становив 7,71 мм/рік. За 10-бальною шкалою стійкості (Маховський, 2018) ця величина відповідає 9 балам («малостійкі»). Завдяки внесенню досліджуваних витяжок глибинний показник зменшується до 7 балів, що диференціює цей зразок сталі до групи «занижено стійкі».

Глибинний показник швидкості корозії контрольних зразків сталі 30ХГСА становив 42,65 мм/рік. За десятибальною шкалою стійкості це відповідає 10 балам («нестійкі»). У результаті внесення досліджуваних водних вилучень цей параметр зменшується до 8 балів, що диференціює цей зразок сталі до групи «малостійкі».

Коефіцієнт гальмування швидкості корозії для сталі Ст1пс був у діапазоні 9,56–15,12, а для сталі 30ХГСА – в інтервалі 1,05–13,20.

Обговорення

Вибір рослинної сировини для дослідження був зумовлений декількома причинами. Зокрема, коріння кульбаби лікарської містить каучук (до 3%), який, імовірно, може формувати захисний шар на поверхні зразків металів. Соняшник звичайний є основною олійною культурою Запорізького регіону, рештки якої в чималих кількостях залишаються на полях. Амброзія полинолиста – це агресивна карантинна рослина, що негативно впливає як на людське здоров'я, так і на аграрний сектор. У межах нашого дослідження зроблено спробу використати її з конструктивною метою, спрямованою на поліпшення екологічної ситуації в регіоні.

Проведене нами експериментальне дослідження продемонструвало позитивний вплив усіх водних витяжок із рослинної сировини на сталь Ст1пс, а також позитивний вплив витяжки із соняшнику, суміші витяжок амброзії та інших двох рослин на сталь 30ХГСА у сульфатнокислому середовищі.

Також з'ясовано вплив обробки поверхні зразків на інтенсивність процесу корозії. Торці й отвори сталевих пластин, які не були оброблені на шліфувально-карусельному верстаті та відполіровані до блиску, виявили меншу корозійну стійкість, ніж оброблені ділянки.

Основними компонентами досліджуваних рослинних екстрактів, згідно з даними наукової літератури, є поліфеноли, флавоноїди, диглюкозиди, стероїди, каротини, протеїни, заміщені нафтохінони, амінокислоти, терпенові сполуки, інулін та інші.

Властивості цих речовин, які мають у складі атоми нітрогену, кисню, сульфуру та фосфору, а також подвійні зв'язки й ароматичні системи, визначають їхню здатність до адсорбції на металевих поверхнях (Гулай та ін., 2020). Механізм впливу водних екстрактів рослинного походження, застосованих у нашій роботі, можна обґрунтувати на основі вже відомих наукових даних.

Водні й органічні витяжки з кульбаби лікарської (*Taraxacum officinale*) протягом тривалого часу привертають увагу дослідників завдяки їхньому значному біологічному впливу, у якому можна виділити антибактеріальну, фунгіцидну й антиоксидантну дію (Mitrović et al., 2024). Доведено, що кореневий екстракт цієї рослини виступає змішаним інгібітором корозійних процесів, впливає переважно на анодну реакцію. Механізм його дії, імовірно, полягає в утворенні адсорбційного шару на анодних ділянках, що сприяє зменшенню швидкості корозії та захисту металевих поверхонь від руйнування. Оскільки молекули інуліну містять гідроксильні групи, вони можуть формувати міцні комплекси з металами, що, імовірно, пояснює адсорбційну здатність цього екстракту (Mitrović et al., 2024).

Витяжка кореня кульбаби (*Taraxacum officinale*) містить багатий набір біологічно активних сполук, серед яких тараксастерин, фруктоза, сахароза, тетрагідроридентин В, органічні (винна, лимонна) та фенолкарбонові кислоти. Ці компоненти надають екстракту антикорозійні властивості завдяки значній антиоксидантній дії та здатності утворювати хелатні комплекси з металами, що сприяє формуванню ефективного захисного шару та зменшує корозію (Wazzan et al., 2024). Органічні складники кульбабового екстракту мають значно вищі дипольні моменти порівняно з водою, що забезпечує легке витіснення водних молекул з поверхні металу. Автори вважають, що інгібувальний процес тісно пов'язаний зі здатністю молекул інгібітора до сорбції, це реалізується завдяки трьом ключовим механізмам, як-от:

– хімічний механізм: відбуваються донорно-акцепторні взаємодії між гетероатомами, що мають вільні електронні пари, та п-електронами кратних зв'язків, а також взаємодія з вакантними d-орбіталями атомів заліза;

– фізична адсорбція: виникає завдяки електростатичному притяганням між зарядженою металевою поверхнею та зарядженими частинками інгібітора;

– передача електронної густини: додатковий негативний заряд переміщується з d-орбіталі атомів заліза на вільну p*-орбіталь молекул інгібітора, що сприяє стабільному зв'язуванню (Deyab & Guibal, 2020). Також екстракт характеризується високою біодеградаційністю (96%) та низьким рівнем токсичності (2,38), що свідчить про його екологічну безпечність (Žbulj et al., 2024).

Соняшник (*Helianthus annuus* L.), що належить до родини айстрових, є важливою олійною культурою, проте після збору врожаю його головки часто розглядаються як відходи. Водночас вони містять цінні органічні сполуки з високою концентрацією полярних груп, що робить їх перспективним матеріалом для розширення діапазону антикорозійного захисту металів. Дослідження (Ma et al., 2019) свідчать, що пектин, виділений із залишків соняшникових головок, здатний пригнічувати кислотну корозію через механізм фізичної адсорбції. Процес захисту сталі від кислотної корозії за допомогою пектину із соняшникової головки, на думку авторів (Ma et al., 2019), відбувається таким чином. Загальновідомо, що хлорид-іон має синергічний ефект із корозійними інгібіторами, посилюючи їхню дію. У кислому середовищі молекули пектину проходять процес протонування, набуваючи позитивного заряду, що знижує їхню здатність до адсорбції на позитивно зарядженій сталевій поверхні. Однак хлорид-іони, присутні в розчині HCl, легко адсорбуються на металевій поверхні завдяки електростатичним силам, змінюючи її заряд на негативний. За підвищеної кислотності карбоксильні групи ($-\text{COOH}$) у складі пектину перетворюються на $-\text{COOH}^{2+}$. Ці частинки можуть формувати вандерваальсові зв'язки із хлорид-іоном через електростатичну взаємодію. У результаті адсорбовані молекули пектину утворюють щільний захисний шар, що перешкоджає корозії металу. Отже, саме електростатична взаємодія між протонуваними частинками пектину та хлорид-іонами забезпечує ефективний процес фізичної адсорбції на сталевій поверхні. Функціональні групи $\text{CH}_3\text{COO}-$ і $-\text{O}-$ можуть утворювати координаційні зв'язки з атомами заліза, витіснити агресивні частинки з поверхні сталі та блокувати зони активної корозії.

Було встановлено, що інгібувальна ефективність екстракту соняшнику підвищується зі збільшенням його концентрації та зменшенням температури (Wang et al., 2022).

Амброзія полинолиста (*Ambrosia artemisiifolia*) ще не отримала належної уваги як потенційне джерело інгібіторів корозії. Існує лише обмежена кількість наукових робіт, що досліджують антикорозійні властивості представників роду Амброзія. Одне з досліджень припускає (Elabbasy et al., 2019), що екстракт амброзії приморської (*Ambrosia maritima*) проявляє здатність пригнічувати корозію через адсорбцію активних компонентів на поверхні металу. Було також визначено, що цей екстракт поводить як інгібітор змішаного типу, впливає як на анодні, так і на катодні реакції корозійного процесу (Abdel-Gaber et al., 2008).

Отже, можна припустити, що механізми інгібування корозії рослинними екстрактами, вибраними для дослідження, мають схожі принципи дії. Взаємодія компонентів рослинних витяжок із поверхнею металу може відбуватися за реакційними центрами, де сконцентрована найбільша електронна густина: по оксигену, нітрогену, сульфурі тощо. Утворюються комплексні сполуки хелатного типу з координаційними зв'язками з атомами заліза, які створюють умови для захисту металевої поверхні від корозії. Під час адсорбції на атомах заліза й інших перехідних металів із неповними d-підрівнями органічні інгібітори відіграють роль донорів електронів, тоді як метали – роль акцепторів. Що вища електронна густина в адсорбційно активній частині молекули інгібітора, то міцніший адсорбційний зв'язок «метал – інгібітор» і то вищий ступінь захисту (Syza et al., 2016).

Проте ключовою проблемою для повного розуміння механізму впливу таких природних інгібіторів залишається аналіз внеску кожного окремого компонента та їхньої взаємодії в загальному процесі. Багатокомпонентність водних і органічних вилучень суттєво ускладнює визначення специфічної ролі кожної речовини в корозійно-захисному ефекті. Проведення подальших експериментальних досліджень і аналізів є необхідним для розкриття індивідуального та синергічного впливу компонентів інгібітора.

Висновки

Проведені дослідження показали, що рослини, вибрані для вивчення, можуть слугувати джерелом створення екологічно чистих інгібіторів і підвищувати антикорозійну стійкість металів у кислому середовищі.

Пропонується використовувати залишки сільськогосподарських відходів (стебло,

листя та головка соняшнику звичайного), лікарської сировини (кульбаба лікарська) та залишки карантинної рослини (амброзія полинолиста) після скошування або виривання для подальших досліджень і розроблення ефективних «зелених» інгібіторів корозії. Водночас це дозволить зменшити обсяги сільськогосподарських відходів і знизити ризик захворювання населення на амброзійний поліноз.

Отримані результати демонструють перспективність подальших досліджень зазначених рослинних водних вилучень і можливість розширення спектра експерименту з метою протидії кислотній корозії. Зокрема, цікавим напрямом є дослідження антикорозійної стійкості металевих зразків за їх попередньої обробки «зеленим» інгібітором із подальшим зануренням у корозійно активне середовище.

Список використаної літератури

Гулай О., Шемет В., Жилко В., Клімович О. Інгібіторна ефективність і склад екстракту кори дуба. *Праці наукового товариства імені Шевченка. Хімічні науки*. 2020. Т. 60. С. 107–117. <http://dx.doi.org/10.37827/ntsh.chem.2020.60.107>.

Маховський В. Конспект лекцій з дисципліни «Захист обладнання від корозії» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія». Кам'янське : ДДТУ, 2018. 44 с.

Петруша Ю., Пушкарьова Є., Сохрякова І. Дослідження антикорозійних властивостей водних вилучень з рослинної сировини. *Екологічні науки*. 2024. № 4 (55). С. 207–210. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.34>.

Повзло В. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Корозія та захист металів» для студентів спеціальності 136 «Металургія» усіх форм навчання. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. 34 с.

Хома М. Стан і перспективи розвитку досліджень у галузі корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів в Україні. *Вісник Національної академії наук України*. 2021. № 12. С. 99–106. <https://doi.org/10.15407/vism2021.12.099>.

Abdel-Gaber A.M., Khamis E., Abo-El-Dahab H., Adeel Sh. Inhibition of aluminium corrosion in alkaline solutions using natural compound. *Materials Chemistry and Physics*. 2008. Vol. 109. Is. 2–3. P. 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.11.038>.

Alhaidar B., Reeshah F., Jammoal Y. Natural Sources Extract as Acidic Corrosion Inhibitors. In book: *Corrosion Engineering – Recent Breakthroughs and Innovative Solutions*. Rijeka : Intech Open, 2024. 19 p. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1005150>.

Deyab M.A., Guibal E. Enhancement of corrosion resistance of the cooling systems in desalination plants by green inhibitor. *Scientific Reports*. 2020. № 10. P. 4812. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61810-9>.

Elabbasy H., Zidan S., Fouda Abd El-Aziz. Inhibitive behavior of Ambrosia Maritima extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for carbon steel in 1M HCl. *Zastita materijala*. 2019. № 60. P. 129–146. <http://dx.doi.org/10.5937/zasmat1902129E>.

Kumari P., Lavanya M. Plant extracts as corrosion inhibitors for aluminum alloy in NaCl environment : Recent review. *Journal of the Chilean Chemical Society*. 2022. Vol. 67. № 2. P. 5490–5495. <http://dx.doi.org/10.5937/zasmat1902129E>.

Ma X., Wang J., Xu J., Jing J., Li J., Zhu H., Yu S., Hu Z. Sunflower head pectin with different molecular weights as promising green corrosion inhibitors of carbon steel in hydrochloric acid solution. *ACS Omega*. 2019. Vol. 4. Is. 25. P. 21148–21160. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02570>.

Mitrović M., Apostolov S., Fuchs-Godec R., Salkunić B., Vastag G., Tomić M. Dandelion (*Taraxacum officinale*) Root extract as a green corrosion inhibitor of steel in 3% NaCl. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*. 2024. № 68 (4). P. 609–619. <https://doi.org/10.3311/PPch.37211>.

Syza O.I., Savchenko O.M., Kvashuk Yu.V., Shtyl' N.A., Chelyabieva V.M. New inhibitors based on vegetable raw materials and the regularities of their adsorption on the steel surface. *Materials Science*. 2016. Vol. 51. № 5. P. 627–637. <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9884-6>.

Wang J., Ma X., Tabish M., Wang J. Sunflower-head extract as a sustainable and eco-friendly corrosion inhibitor for carbon steel in hydrochloric acid and sulfuric acid solutions. *Journal of Molecular Liquids*. 2022. Vol. 367. Part B. P. 120429. <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120429>.

Wazzan N., Obot I.B., Lgaz H., Safi Z., Al-Qurashi O. Multiscale computational modeling of phytochemicals for iron corrosion inhibition: Bridging DFT, SCC-DFTB, and molecular dynamics

for eco-friendly solutions. *Journal of Molecular Liquids*. 2024. Vol. 406. P. 125070. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125070>.

Žbulj K., Hrnčević L., Bilić G., Simon K. Dandelion-Root Extract as green corrosion inhibitor for carbon steel in CO₂-saturated brine solution. *Energies*. 2022. Vol. 15. № 9. P. 3074. <https://doi.org/10.3390/en15093074>.

References

Ghulaj, O., Shemet, V., Zhylko, V., & Klimovych, O. (2020). Inhibitor efficacy and composition of oak bark extract. *Praci naukovogho tovarystva im. Shevchenka. Khimichni nauky [Proc. Shevchenko Sci. Soc. Chem. Sci.]*, 60, 107–117. <http://dx.doi.org/10.37827/ntsh.chem.2020.60.107> [in Ukrainian].

Makhovskyi, V. (2018). Konspekt lekcij z dyscypliny “Zakhyst obladnannja vid koroziji” dlja zdobuvachiv vyshhoji osvity pershogho (bakalavrsjckogho) rivnja zi specialnosti 161 “Khimichni tekhnologiji ta inzhenerija” [Lecture notes on the discipline “Protection of equipment from corrosion” for first-year (bachelor’s) higher education students in specialty 161 “Chemical technologies and engineering”]. Kamianske : DDTU [in Ukrainian].

Petrusha, Ju., Pushkarjova, Je., & Sokhrjakova, I. (2024). Doslidzhennja antykorozijnykh vlastyvostryj vodnykh vyluchenj z roslynnoji syrovyny [Research of the anti-corrosion properties of aqueous extracts from plant raw materials]. *Ekologichni nauky [Environmental Sciences]*, 4 (55), 207–210. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.34> [in Ukrainian].

Povzlo, V. (2020). Metodychni vkazivky do vykonannja laboratornykh robit z dyscypliny “Korozija ta zakhyst metaliv” dlja studentiv specialnosti 136 “Metalurghija” usikh form navchannja [Methodological instructions for performing laboratory work in the discipline “Corrosion and protection of metals” for students of specialty 136 “Metallurgy” of all forms of study]. Zaporizhzhja : NU “Zaporizjka politekhnika” [in Ukrainian].

Khoma, M. (2021). Stan i perspektyvy rozvytku doslidzhenj u ghaluzi koroziji ta protykorozijnogho zakhystu konstrukcijnykh materialiv v Ukrajinі [Status and prospects for the development of research in the field of corrosion and anti-corrosion protection of structural materials in Ukraine]. *Visnyk NAN Ukrajinjy [Bulletin of the NAS of Ukraine]*, 12, 99–106. <https://doi.org/10.15407/vsn2021.12.099> [in Ukrainian].

Abdel-Gaber, A.M., Khamis, E., Abo-El-Dahab, H., & Adeel, Sh. (2008). Inhibition of aluminium corrosion in alkaline solutions using natural compound. *Materials Chemistry and Physics*, 109 (2–3), 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.11.038> [in English].

Alhaidar, B., Reeshah, F., & Jammoal, Y. (2024). Natural Sources Extract as Acidic Corrosion Inhibitors. In book: *Corrosion Engineering – Recent Breakthroughs and Innovative Solutions*. Rijeka: Intech Open. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1005150> [in English].

Deyab, M.A., & Guibal, E. (2020). Enhancement of corrosion resistance of the cooling systems in desalination plants by green inhibitor. *Scientific Reports*, 10, 4812. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61810-9> [in English].

Elabbasy, H., Zidan, S., & Fouda, Abd El-Aziz (2019). Inhibitive behavior of Ambrosia Maritima extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for carbon steel in 1M HCl. *Zastita materijala*, 60, 129–146. <http://dx.doi.org/10.5937/zasmat1902129E> [in English].

Kumari, P., & Lavanya, M. (2022). Plant extracts as corrosion inhibitors for aluminum alloy in NaCl environment – Recent review. *Journal of the Chilean Chemical Society*. 67 (2), 5490–5495. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-97072022000205490> [in English].

Ma, X., Wang, J., Xu, J., Jing, J., Li, J., Zhu, H., Yu, S., & Hu, Z. (2019). Sunflower head pectin with different molecular weights as promising green corrosion inhibitors of carbon steel in hydrochloric acid solution. *ACS Omega*, 4 (25), 21148–21160. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02570> [in English].

Mitrović, M., Apostolov, S., Fuchs-Godec, R., Salkunić, B., Vastag, G., & Tomić, M. (2024). Dandelion (*Taraxacum officinale*) Root extract as a green corrosion inhibitor of steel in 3% NaCl. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 68 (4), 609–619. <https://doi.org/10.3311/PPch.37211> [in English].

Syza, O.I., Savchenko, O.M., Kvashuk, Yu.V., Shtyl', N.A., & Chelyabieva, V.M. (2016). New inhibitors based on vegetable raw materials and the regularities of their adsorption on the steel surface. *Materials Science*, 51 (5), 627–637. <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9884-6> [in English].

Wang, J., Ma, X., Tabish, M., & Wang, J. (2022). Sunflower-head extract as a sustainable and eco-friendly corrosion inhibitor for carbon steel in hydrochloric acid and sulfuric acid solutions. *Journal of Molecular Liquids*, 367 (Part B), 120429. <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120429> [in English].

Wazzan, N., Obot, I.B., Lgaz, H., Safi, Z., & Al-Qurashi, O. (2024). Multiscale computational modeling of phytochemicals for iron corrosion inhibition: Bridging DFT, SCC-DFTB, and molecular dynamics for eco-friendly solutions. *Journal of Molecular Liquids*, 406, 125070. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125070> [in English].

Žbulj, K., Hrnčević, L., Bilić, G., & Simon, K. (2022). Dandelion-Root Extract as green corrosion inhibitor for carbon steel in CO₂-saturated brine solution. *Energies*, 15 (9), 3074. <https://doi.org/10.3390/en15093074> [in English].

Отримано: 25.04.2025

Прийнято: 15.05.2025



АГРОНОМІЯ

УДК 631.5:633.11

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.15>

ФОРМУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ПРОДУКТИВНОСТІ РОСЛИНАМИ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ РІЗНИХ РІЗНОВИДІВ ЗАЛЕЖНО ВІД НОРМ ВИСІВУ В УМОВАХ ПІВНІЧНОГО СТЕПУ УКРАЇНИ

О. О. Вінюков¹, О. Б. Лапко², О. Б. Бондарева³

Норма висіву є одним з основних дієвих елементів формування ефективного продуктивного стеблостоя, тобто максимального рівня продуктивності. Мета досліджень полягала в установленні реакції різних різновидів пшениці озимої на норми висіву в умовах східної частини Північного Степу України. Дослідження проводились у польовій сівозміні Донецької державної сільськогосподарської дослідної станції Національної академії аграрних наук України протягом 2021–2024 років. Для сівби використовували сорти пшениці Вежа (*Lutescens*) та Юзовська (*Erythrosperum*). За використання норми висіву 1,5 млн шт./га рослини сорту Юзовська формували зерен у колосі на 8 штук, за сівби нормою висіву 4,5 млн шт./га – на 9 штук, а за норми висіву 6,5 млн. шт./га – на 6 штук менше, ніж рослини сорту Вежа. За використання менших норм висіву (1,5 та 2,5 млн шт./га) показник маси 1 000 зерен був вищим у сорту Вежа на 0,48 та 0,52 г відповідно. За підвищення норм висіву більша маса 1 000 зерен була в сорту Юзовська: 3,5 млн шт./га – на 9,40 г; 4,5 млн шт./га – 3,05 г; 5,5 млн шт./га – 6,18 г; 6,5 млн шт./га – 0,63 г. Установлено, що в середньому за роки досліджень найкращі показники врожайності пшениці озимої сорту Вежа (*Lutescens*) одержано за норми висіву 4,5 млн шт./га (6,2 т/га), сорту пшениці озимої Юзовська (*Erythrosperum*) – 3,5 млн шт./га (6,9 т/га). Установлено, що залежно від умов року норми висіву по-різному впливали на рівень продуктивності рослин. За сприятливих умов вегетації (2023 рік) вищий рівень урожайності формувалася в сорту Вежа за норми висіву

¹ доктор сільськогосподарських наук, професор,
в.о. директора
(Донецька державна сільськогосподарська дослідна станція Національної академії аграрних наук України, с. Гришине)
e-mail: alex.agronomist@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2957-5487

² молодший науковий співробітник
(Донецька державна сільськогосподарська дослідна станція Національної академії аграрних наук України, с. Гришине)
e-mail: lapkoaleksey@gmail.com
ORCID: 0009-0006-4687-6114

³ кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник, учений секретар
(Донецька державна сільськогосподарська дослідна станція Національної академії аграрних наук України, с. Гришине)
e-mail: olbraun58dds@ukr.net
ORCID: 0000-0002-8128-8485

4,5 млн шт./га – 8,9 т/га, у сорту Юзовська за норми висіву 3,5 млн шт./га – 9,3 т/га. У посушливих умовах вегетації (2024 рік) найвища продуктивність рослин пшениці озимої обох різновидів була за норми висіву 2,5 млн шт./га: Вежа – 4,4 т/га; Юзовська – 4,8 т/га. Отже, рослини пшениці озимої різновиду *Erythrospermum* формують вищий урожай у разі меншої норми висіву (3,5 млн шт./га), ніж рослини різновиду *Lutescens* (4,5 млн шт./га), у посушливих умовах вегетації норму висіву варто знижувати до 2,5 млн шт./га.

Ключові слова: пшениця озима, різновид, норма висіву, показники структури врожаю, урожайність.

THE FORMATION OF PRODUCTIVITY INDICATORS OF WINTER WHEAT PLANTS OF DIFFERENT VARIETIES DEPENDING ON THE SOWING RATES IN THE CONDITIONS OF THE NORTHERN STEPPE OF UKRAINE

O. O. Vinyukov, O. B. Lapko, O. B. Bondareva

The seeding rate is one of the main effective elements of the formation of an effective productive stem, that is, the maximum level of productivity. The purpose of the research was to establish the reaction of different varieties of winter wheat to seeding rates in the conditions of the eastern part of the Northern Steppe of Ukraine. The research was conducted in the field crop rotation of the Donetsk State Agricultural Research Station of the NAAS of Ukraine during 2021–2024. The wheat varieties Vezha (*Lutescens*) and Yuzovska (*Erythrospermum*) were used for sowing. When using a seeding rate of 1,5 million pcs./ha, plants of the Yuzovska variety formed 8 grains per ear, when sowing at a seeding rate of 4,5 million pcs./ha – 9 pcs., and at a seeding rate of 6,5 million pcs./ha – 6 pcs. less than plants of the Vezha variety. When using lower seeding rates (1,5 and 2,5 million pcs./ha), the 1 000-grain weight was higher in the Vezha variety by 0,48 and 0,52 g, respectively. When seeding rates were increased, the 1 000-grain weight was higher in the Yuzovska variety: 3,5 million pcs./ha – by 9,40 g; 4,5 million pcs./ha – 3,05 g; 5,5 million pcs./ha – 6,18 g; 6,5 million pcs./ha – 0,63 g. It was found that on average over the years of research, the best yield indicators of winter wheat of the Vezha variety (*Lutescens*) were obtained at a seeding rate of 4,5 million pcs./ha (6,2 t/ha), of the winter wheat variety Yuzovska (*Erythrospermum*) – 3,5 million pcs./ha (6,9 t/ha). It was found that depending on the conditions of the year, seeding rates had different effects on the level of plant productivity. Under favorable vegetation conditions (2023), the highest yield level was formed in the Vezha variety at a seeding rate of 4,5 million pcs./ha – 8,9 t/ha, in the Yuzovska variety at a seeding rate of 3,5 million pcs./ha – 9,3 t/ha. Under arid vegetation conditions (2024), the highest productivity of winter wheat plants of both varieties was at a seeding rate of 2,5 million pcs./ha: Vezha – 4,4 t/ha; Yuzovska – 4,8 t/ha. Thus, winter wheat plants of the *Erythrospermum* variety produce a higher yield at a lower seeding rate (3,5 million pcs./ha) than plants of the *Lutescens* variety (4,5 million pcs./ha), and under dry vegetation conditions the seeding rate should be reduced to 2,5 million pcs./ha.

Key words: winter wheat, variety, seeding rate, yield structure indicators, yield.

Вступ

Останніми роками значно зросла частка впливу погодних умов на продуктивність сільськогосподарських культур, зокрема й головної зернової культури України – пшениці озимої. Протистояти цим явищам можна шляхом установалення сортових особливостей і підбором сортів із високими показниками адаптивності до конкретних умов вирощування (Солодушко, 2014; Черенков та ін., 2014; Каленська та ін., 2015; Черенков та ін., 2021; Korkhova et al., 2023).

Аналіз інформаційних джерел результатів іноземних і вітчизняних досліджень свідчить, що визначення адаптивного потенціалу сортів і раціональне використання їхніх

можливостей формування максимального рівня продуктивності – натеper актуальний елемент технології і реальний шлях ефективного використання поживних речовин і вологи рослинами протягом своєї вегетації завдяки оптимізації фізіологічного стану агроценозу (Solodushko et al., 2021; Чугрій та ін., 2022; Hasanova et al., 2023; Ліхушина і Скина, 2024).

Адаптивний потенціал сучасних сортів пшениці озимої має максимально розкриватися за оптимального співвідношення всіх біотичних і абіотичних чинників (Штакал та ін., 2022; Самойлик та ін., 2023; Sallam et al., 2024), саме тому норма висіву натеper є одним з основних дієвих елементів формування ефективного продуктивного стебло-

стою (Intsar et al., 2019; Twizerimana et al., 2020; Чугрій та ін., 2021; Колібабчук та ін., 2022; Фанін і Литвиненко, 2023; Хорошун і Назаренко, 2024).

Донецька область розташована у східній частині Північного Степу України і за кліматичними умовами належить до зони ризикованого нестійкого землеробства (Науково ..., 2007). Територія землекористування характеризується континентальним кліматом із жарким сухим літом, малосніжною з відлигами зимою. За багаторічними даними, середньорічна температура повітря становить 7,6–8,0 °C.

Веgetаційний період триває 208 діб, а тривалість періоду з температурою вище +10 °C становить 160–170 діб. Сума позитивних температур за вегетацію – 3 010 °C. Безморозний період триває в середньому 150–160 діб.

Середньорічна кількість опадів – 542 мм, максимум опадів припадає на червень (середньобагаторічна – 56 мм), які випадають зливами, мінімум – на березень (середньобагаторічна – 35 мм). Гідротермічний коефіцієнт – 0,9. Запаси вологи у ґрунті характеризуються нерівномірністю і формуються під впливом осінньо-весняних опадів. Відносна вологість повітря в літні місяці – 58–63%, порівняно низька, що негативно позначається на вегетації рослин. Кількість діб із відносною вологістю повітря 30% і нижче – 60 за рік.

Метою досліджень було встановлення реакції різних різновидів пшениці озимої на норми висіву в умовах східної частини Північного Степу України.

Завданнями дослідження передбачалось вивчення впливу норм висіву на біометричні показники пшениці озимої різних різновидів і формування рослинами показників структури врожаю.

Матеріал і методи

Дослідження проводилися у 2021–2024 рр. на дослідному полі Донецької державної сільськогосподарської дослідної станції Національної академії аграрних наук України. Повторність у дослідах – триразова. Розміщення ділянок – систематичне. Площа облікової ділянки – 25 м².

Ґрунтовий покрив місця проведення дослідів представлений чорноземом звичайним малогумусним, важко суглинковим. Уміст гумусу в орному шарі становить 4,5%. Валовий уміст основних поживних речовин: N – 0,28–0,31%, P₂O₅ – 0,16–0,18%, K₂O – 1,8–2,0%. Реакція ґрунтового розчину гуму-

сового горизонту чорнозему слабо лужна, близька до нейтральної (рН водної суспензії становить 6,9).

Попередник – чорний пар. Мінеральні добрива вносились під час сівби. Сівбу здійснювали 17 вересня сівалкою СН-16 в агрегаті зі трактором Т-25. Спосіб сівби – суцільний рядковий, із шириною міжрядь 15 см. Глибина загортання насіння у ґрунт – 4–5 см. З метою покращання умов для його проростання проводили ущільнення ґрунту кільчасто-шпоровими котками ЗККШ-6А.

Технологія вирощування – загальноприйнята для зернових культур у східній частині Північного Степу, окрім вибраних для вивчення питань, та відповідала зональним і регіональним рекомендаціям.

У своїх дослідженнях ми вивчали вплив норм висіву в діапазоні від 1,5 млн шт. схожих насінин на га до 6,5 млн шт. схожих насінин на га пшениці озимої різних різновидів двох сортів – Вежа (*Lutescens*) і Юзовська (*Erythrospermum*).

Основний метод досліджень – польовий, який доповнювався аналітичними дослідженнями, вимірами, підрахунками та спостереженнями відповідно до загальноприйнятих методик у рослинництві (Методичні ..., 2003). Статистичне оцінювання виконано за допомогою ПКП “Statistica”.

Результати та їх обговорення

Продуктивність пшениці озимої залежить від багатьох чинників, одним із яких є кількість колосоносних стебел на одиниці площі. Саме це є основним показником, на який безпосередньо впливає норма висіву. Формування ефективного стеблостою сприяє рівномірному розподілу продуктивної вологи та поживних речовин між рослинами, що, зрештою, створює підґрунтя для закладки рослинами показників структури врожаю.

Кількість продуктивних стебел за сівби нормою висіву 1,5 млн шт./га у сорту Вежа становила 435 шт./м², що перевищувало сорт Юзовська на 75 шт./м². За норм висіву від 2,5 до 4,5 млн шт./га рослини сорту Юзовська переважали рослини сорту Вежа: 2,5 млн шт./га – на 100 шт./м²; 3,5 млн шт./га – 280 шт./м²; 4,5 млн шт./га – на 45 шт./м². За найвищих норм висіву (5,5 і 6,5 млн шт./га) рослини обох сортів мали однакову кількість продуктивних стебел на одиниці площі (табл. 1).

Довжина колосу сорту Вежа за норм висіву від 1,5 до 4,5 млн шт./га була майже

Таблиця 1

Показники структури врожаю пшениці озимої залежно від норми висіву, 2021–2024 рр.

Норма висіву (млн шт./га)	Кіл-ть. прод. стебел, шт./м ²	Довжина колосу, см	Маса зерна з колосу, г	Кількість зерен у колосі, шт.	Маса 1 000 зерен, г
Вежа (<i>Lutescens</i>)					
1,5	435	9,8	2,51	42	50,20
2,5	475	9,5	1,99	38	52,40
3,5	490	8,0	1,45	35	41,43
4,5	585	9,4	1,84	42	44,34
5,5	715	8,0	1,03	27	38,15
6,5	845	7,5	1,07	28	38,21
НІР ₀₅	6,9	1,1	0,3	1,9	3,2
Юзовська (<i>Erythrospermum</i>)					
1,5	360	9,5	1,79	36	49,72
2,5	575	8,5	1,79	35	51,88
3,5	770	8,5	1,56	30	50,83
4,5	630	8,0	1,09	33	47,39
5,5	715	8,0	1,33	30	44,33
6,5	845	7,5	0,84	22	38,84
НІР ₀₅ : сорт	7,3	0,5	0,2	2,2	3,8
норма висіву	9,1	0,9	0,2	2,7	2,9
взаємодія	8,0	0,7	0,3	2,5	3,2

однакова, у результаті збільшення норми висіву цей показник істотно знижувався. Найменший колос був за норми висіву 6,5 млн шт./га – 7,5 см.

Кількість зерен у колосі рослин сорту Вежа найбільшою була за сівби нормою 1,5 та 4,5 млн шт./га – 42 шт. За норм висіву 5,5 та 6,5 млн шт./га кількість зерен у колосі зменшувалась на 15 та 14 шт. відповідно.

Щодо маси 1 000 зерен, найкращим цей показник був за норми висіву 2,5 млн шт./га (52,40 г), а найнижчим – за 5,5 млн шт./га (38,15 г).

За показником довжини колосу рослин сорту Юзовська сформували приблизно однакові показники незалежно від норми висіву. Вона варіювалася від 6,5 см (7,5 млн шт./га) до 9,5 см (1,5 млн шт./га).

Кількість зерен у колосі рослин пшениці озимої сорту Юзовська була менше за кількість у колосі рослин сорту Вежа незалежно від норми висіву. Так, за використання 1,5 млн шт./га рослини сорту Юзовська формували зерен у колосі менше на 8 шт., за сівби нормою висіву 4,5 млн шт./га – на 9 шт., а за норми висіву 6,5 млн шт./га – на 6 шт.

Маса 1 000 зерен у сортів, що вивчалися, різнилась залежно від норми висіву. Так, за використання менших норм висіву (1,5 та 2,5 млн шт./га) маса 1 000 зерен була вищою в сорту Вежа на 0,48 та 0,52 г відповідно,

порівняно із сортом Юзовська. У разі підвищення норм висіву більша маса 1 000 зерен була в сорту Юзовська: 3,5 млн шт./га – на 9,40 г; 4,5 млн шт./га – 3,05 г; 5,5 млн шт./га – 6,18 г; 6,5 млн шт./га – 0,63 г. Тобто норма висіву мала менший вплив на масу 1 000 зерен сорту Юзовська порівняно із сортом Вежа.

Вплив норм висіву на ріст і розвиток рослин пшениці озимої найкраще демонструє врожайність зерна (табл. 2).

За стандарт ми свідомо вибрали норму висіву 4,5 млн, яка є найбільш поширеною в господарствах зони Степу.

Найвищий рівень продуктивності сорту пшениці озимої Вежа різновиду *Lutescens* забезпечила норма висіву 4,5 млн шт./га (6,2 т/га). У середньому за роки досліджень жодна із запропонованих норм висіву не сприяла збільшенню рівня врожаю порівняно з контрольною нормою висіву – 4,5 млн шт./га.

Використання різних норм висіву у вирощуванні сорту пшениці озимої Юзовська різновиду *Erythrospermum* сприяло поступовому підвищенню рівня врожайності від найменшої норми (1,5 млн шт./га) до 3,5 млн шт./га, відповідно від 4,6 до 6,9 т/га. Зі збільшенням норми висіву врожайність знижувалась до 5,1 т/га, за норми 6,5 млн шт./га. Найвищий рівень продуктивності в середньому за роки проведення

Таблиця 2

Урожайність зерна пшениці озимої залежно від норми висіву, 2021–2024 рр.

Норма висіву (млн шт./га)	Урожайність, т/га					Прибавка	
	2021 р.	2022 р.	2023 р.	2024 р.	Серед.	т/га	%
Вежа (<i>Lutescens</i>)							
1,5	4,0	6,6	5,8	4,1	5,1	-1,1	-17,7
2,5	4,8	7,2	6,8	4,4	5,8	-0,4	-6,5
3,5	5,9	6,2	5,5	3,6	5,3	-0,9	-14,5
4,5	6,7	6,4	8,9	2,8	6,2	–	–
5,5	6,9	5,1	6,4	3,2	5,4	-0,8	-12,9
6,5	6,0	5,0	8,2	2,3	5,4	-0,8	-12,9
Юзовська (<i>Erythrospermum</i>)							
1,5	4,3	6,3	3,4	4,2	4,6	-0,9	-16,4
2,5	5,1	6,6	7,4	4,8	6,0	0,5	9,1
3,5	7,0	7,1	9,3	4,0	6,9	1,4	25,5
4,5	7,3	6,5	5,6	2,6	5,5	–	–
5,5	7,1	5,6	8,2	2,3	5,8	0,3	5,5
6,5	6,1	5,7	6,3	2,1	5,1	-0,4	-7,3
НІР ₀₅ : сорт норма висіву взаємодія					0,5 0,3 0,7		

досліджень формувався за сівби нормою 3,5 млн шт./га – 6,9 т/га, що перевищувало контроль (4,5 млн шт./га) на 25,5%. А найменший за сівби нормою висіву 1,5 млн шт./га – 4,6 т/га (менше на 16,4% порівняно з контролем).

Порівнянням сортів один з одним було встановлено, що залежно від умов року норми висіву по-різному впливали на рівень продуктивності рослин. За більш сприятливих умов вегетації вищий рівень урожайності формувався в сорту Вежа за норми висіву 5,5 млн шт./га – 6,9 т/га (2021 р.) та 4,5 млн шт./га – 8,9 т/га (2023 р.). Сорт Юзовська забезпечував найвищу продуктивність за норми висіву 4,5 млн шт./га – 7,3 т/га (2021 р.) та 3,5 млн шт./га – 9,3 (2023 р.).

Посушливі умови (2024 р.) істотно знижували врожайність обох сортів, але завдяки зниженню норми висіву вдалося стабілізувати врожайність. Найвища продуктивність рослин пшениці озимої обох сортів була за норми висіву 2,5 млн шт./га: Вежа – 4,4 т/га; Юзовська – 4,8 т/га.

Висновки

Визначено, що норми висіву мали несуттєвий вплив на формування рослинами пшениці озимої сортів Вежа та Юзовська довжини колосу. Проте за кількістю зерен у колосі рослини сорту Юзовська різновиду *Erythrospermum* поступалися рослинам сорту Вежа різновиду *Lutescens* незалежно

від норми висіву. Так, за використання 1,5 млн шт./га рослини сорту Юзовська формували зерен у колосі менше на 8 шт., за сівби нормою висіву 4,5 млн шт./га – на 9 шт., а за норми висіву 6,5 млн шт./га – на 6 шт.

Щодо маси 1 000 зерен, за використання менших норм висіву (1,5 та 2,5 млн шт./га) цей показник був вищим у сорту Вежа на 0,48 і 0,52 г відповідно, порівняно із сортом Юзовська. У результаті підвищення норм висіву більша маса 1 000 зерен була в сорту Юзовська: 3,5 млн шт./га – на 9,40 г; 4,5 млн шт./га – 3,05 г; 5,5 млн шт./га – 6,18 г; 6,5 млн шт./га – 0,63 г. Тобто норми висіву мали менший вплив на масу 1 000 зерен сорту Юзовська порівняно із сортом Вежа.

За роки проведення досліджень було встановлено, що найбільш сприятливі умови для формування врожайності пшениці озимої сорту Вежа різновиду *Lutescens* створювались за норми висіву 4,5 млн шт./га (6,2 т/га). Використання різних норм висіву у вирощуванні сорту пшениці озимої Юзовська різновиду *Erythrospermum* сприяло поступовому підвищенню рівня врожайності від найменшої норми (1,5 млн шт./га) до 3,5 млн шт./га, від 4,6 до 6,9 т/га. Зі збільшенням норми висіву врожайність знижувалась до 5,1 т/га за норми 6,5 млн шт./га.

Установлено, що залежно від умов року норми висіву по-різному впли-

вали на рівень продуктивності рослин. мої обох різновидів була за норми висіву
За посушливих умов вегетації найвища 2,5 млн шт./га: Вежа – 4,4 т/га; Юзовська –
продуктивність рослин пшениці ози- 4,8 т/га.

Список використаної літератури

- Каленська С.М., Токар Б.Ю., Ташева Ю.В. Управління стійкістю рослин зернових культур до вилягання. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Агрономія»*. 2015. Ч. 1. Вип. 210. С. 22–30.
- Колібабчук Т.В., Кузьменко О.В., Зарва О.І., Любич В.В. Урожайність і якість зерна пшениці м'якої озимої залежно від норми висіву. *Агробіологія*. 2022. № 1. С. 168–178. <https://doi.org/10.33245/2310-9270-2022-171-1-168-178>.
- Ліхушина Г.А., Скнипа Н.Л. Вплив стимуляторів росту рослин та фонів живлення на формування біометричних показників пшениці озимої в умовах східної частини Північного Степу України. *Зернові культури*. 2024. Т. 8. № 1. С. 92–100. <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0316>.
- Методичні вказівки щодо проведення польових дослідів з вивчення технологій вирощування зернових культур. Київ : ІЗ УААН, 2003. 22 с.
- Науково обґрунтована система ведення агропромислового виробництва Донеччини. Донецьк : Регіон, 2007. 511 с.
- Самойлик М.О., Устинова Г.Л., Лозінський М.В., Корхова М.М., Уліч О.Л. Оцінка врожайних та адаптивних властивостей нових сортів пшениці м'якої озимої. *Вісник аграрної науки*. 2023. № 2 (839). С. 34–42. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202302-05>.
- Солодушко М.М. Урожайність та адаптивний потенціал сучасних сортів пшениці м'якої озимої в умовах Північного Степу. *Сортовивчення та охорона прав на сорти рослин*. 2014. № 3. С. 61–66.
- Фанін Я.С., Литвиненко М.А. Урожайність та елементи продуктивності рослин сучасних вітчизняних і закордонних сортів озимої м'якої пшениці. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2023. № 1 (38). С. 70–77. <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-1.10>
- Хорошун І.В., Назаренко М.М. Врожайність та якість зерна нових сортів пшениці озимої в умовах Півночі Степу. *Аграрні інновації*. 2024. № 24. С. 227–231. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.24.32>.
- Черенков А.В., Гасанова І.І., Солодушко М.М. Пшениця озима – розвиток та селекція культури в історичному аспекті. *Бюлетень Інституту сільського господарства Степової зони*. 2014. № 6. С. 3–6.
- Черенков А.В., Солодушко М.М., Ярошенко С.С., Гасанова І.І., Педаш О.О., Дудка М.І. Особливості вирощування пшениці озимої в Степу України : монографія. Київ : Аграрна наука, 2021. 184 с. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-521-4>.
- Чугрій Г.А., Вискуб Р.С., Вінюков О.О. Біометричні показники рослин пшениці озимої різних селекційних центрів в умовах східної частини Північного Степу. *Аграрні інновації*. 2021. № 6. С. 50–56. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2021.6.9>.
- Чугрій Г.А., Вискуб Р.С., Поплевко В.І., Шульдц П., Скнипа Н.Л. Наукові принципи підбору сортів пшениці м'якої озимої за адаптивними ознаками. *Аграрні інновації*. 2022. № 11. С. 60–67. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2022.11.8>.
- Штакал М.І., Голик Л.М., Левченко О.С., Шпакович І.В., Іващенко С.Ф. Оцінювання сортів і ліній пшениці озимої за стабільною врожайністю та адаптивністю в умовах зміни клімату Лісостепу. *Вісник аграрної науки*. 2022. № 3 (828). С. 62–69. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202203-08>.
- Intsar H.H., Wahid S.A., Al-Abodi H.M.K., Abdullah S., Mahamud R., Hossain B. Grain yield and quality of wheat as affected by cultivars and seeding rates. *Malaysian Journal of Sustainable Agriculture*. 2019. № 3 (1). P. 8–12. <https://doi.org/10.26480/mjsa.01.2019.08.12>.
- Hasanova I., Yerashova M., Nozdrina N., Pedash O., Kulyk A. Efficiency of winter wheat cultivation after spring barley in the Northern Steppe of Ukraine. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*. 2023. Vol. LXVI. № 2. P. 243–250.
- Korkhova M., Smirnova I., Panfilova A., Bilichenko O. Productivity of winter wheat depending on varietal characteristics and pre-sowing treatment of seeds with biological products. *Scientific Horizons*. 2023. № 26 (5). P. 65–75. <https://doi.org/10.48077/scihor5.2023.65>.

Sallam M., Ghazy A., Al-Doss A., Al-Ashkar I. Combining Genetic and Phenotypic Analyses for Detecting Bread Wheat Genotypes of Drought Tolerance through Multivariate Analysis Techniques. *Life*. 2024. 14. 183. <https://doi.org/10.3390/life14020183>

Solodushko M.M., Gasanova I.I., Yaroshenko S.S., Pedash O.O., Drumova O.M., Astakhova Ya.V., Yerashova M.V., Bezsusidnya Yu.V. Effect of mineral nutrition on winter wheat yield after sunflower in Ukrainian steppe zone. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2021. Vol. 11 (7). P. 179–184. https://doi.org/10.15421/2021_256.

Twizerimana A., Niyigaba E., Mugenzi I., Ngnadong W. A., Li C., Hao T. Q., Hai J.B. The Combined Effect of Different Sowing Methods and Seed Rates on the Quality Features and Yield of Winter Wheat. *Agriculture*. 2020. № 10 (5). P. 153. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050153>.

References

Kalenska, S.M., Tokar, B.Y., & Tasheva, Y.V. (2015). Upravlinnya stiykisty roslin zernovykh kultur do vylyahannya [Management of resistance of cereal crops plants to lodging]. *Naukovyy visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrainy. Seriya: Ahronomiya [Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: Agronomy]*, 210 (1), 22–30 [in Ukrainian].

Kolibabchuk, T., Kuzmenko, O., Zarva, O., & Liubych, V. (2022). Urozhaynist i yakist zerna pshenytsi m'yakoyi ozymoyi zalezho vid normy vysivu [Yield and quality of soft winter wheat depending on the sowing rates]. *Ahrobiolohiya [Agrobiology]*, 1, 168–178. <https://doi.org/10.33245/2310-9270-2022-171-1-168-178> [in Ukrainian].

Metodychni vkazivky shchodo provedennya polovykh doslidiv z vyvchennya tekhnolohiy vyroshchuvannya zernovykh kultur [Methodical instructions for conducting field research on the study of grain cultivation technologies] (2003). Kyiv : IZ UAAN [in Ukrainian].

Naukovo obgruntovana systema vedennya ahropromyslovoho vyrobnytstva Donechchyny [Scientifically substantiated system of agricultural production management in Donetsk] (2007). Donetsk : Rehion [in Ukrainian].

Samoiyk, M., Ustynova, H., Lozinskyi, M., Korkhova, M., & Ulich, O. (2023). Otsinka vrozhaynykh ta adaptivnykh vlastyvostry novykh sortiv pshenytsi myakoyi ozymoyi [Assessment of yield and adaptive properties of new varieties of soft winter wheat]. *Visnyk ahrarnoyi nauky [Bulletin of Agricultural Science]*, 2 (839), 34–42. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202302-05> [in Ukrainian].

Solodushko, M.M. (2014). Urozhaynist ta adaptivnyy potentsial suchasnykh sortiv pshenytsi m'yakoyi ozymoyi v umovakh Pivnichnoho Stepu [Yield and adaptive potential of modern varieties of soft winter wheat in the conditions of the Northern Steppe]. *Sortovyvchennya ta okhorona prav na sorty roslin [Plant Varieties Studying and Protection]*, 3, 61–66 [in Ukrainian].

Fanin, Ya.S., & Litvinenko, M.A. (2023). Urozhaynist ta elementy produktyvnosti roslin u suchasnykh vitchyznyanykh i zakordonnykh sortiv ozymoyi m'yakoyi pshenytsi [Yield and elements of plant productivity in modern domestic and foreign varieties of winter durum wheat]. *Podilskyi visnyk: silske hospodarstvo, tekhnika, ekonomika [Podilian Bulletin Agriculture Engineering Economics]*, 1 (38), 70–77. <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-1.10> [in Ukrainian].

Khoroshun, I.V., & Nazarenko, M.M. (2024). Vrozhaynist ta yakist zerna novykh sortiv pshenytsi ozymoyi v umovakh Pivnochi Stepu [Yield and grain quality of new winter wheat varieties under the conditions of the Northern Steppe] *Ahrarni innovatsiyi [Agrarian innovations]*, 24, 227–231. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.24.32> [in Ukrainian].

Cherenkov, A.V., Hasanova, I.I., & Solodushko, M.M. (2014). Pshenytsya ozyma – rozvytok ta selektsiya kultury v istorychnomu aspekti [Winter wheat – development and selection of culture in historical aspects]. *Byuleten Instytutu silskoho hospodarstva stepovoyi zony [Bulletin of the Institute of Agricultural Economics of the Steppe Zone]*, 6, 3–6 [in Ukrainian].

Cherenkov, A.V., Solodushko, M.M., Yaroshenko, S.S., Hasanova, I.I., Pedash, O.O., & Dudka, M.I. (2021). Osoblyvosti vyroshchuvannya pshenytsi ozymoyi v Stepu Ukrainy: monohrafiya [Peculiarities of winter wheat cultivation in the Steppe of Ukraine: monograph]. Kyiv: Ahrarna nauka. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-521-4> [in Ukrainian].

Chuhrii, H.A., Vyskub, R.S., & Vinyukov, A.A. (2021). Biometrychni pokaznyky roslin pshenytsi ozymoyi riznykh selektsiynykh tsentriv v umovakh skhidnoyi chastyny Pivnichnoho Stepu [Biometric indicators of winter wheat plants of different breeding centers in the Eastern part of the Northern

Steppe]. *Ahrarni innovatsiyi [Agrarian innovations]*, 6, 50–56. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2021.6.9> [in Ukrainian].

Chuhrii, H.A., Vyskub, R.S., Poplevko, V.I., Szulc, P., & Sknypa, N.L. (2022). Naukovi pryntsyipy pidboru sortiv pshenytsi m'yakoyi ozymoyi za adaptivnymi oznakamy [Scientific principles of selection of soft winter wheat varieties according to adaptive characteristics] *Ahrarni innovatsiyi [Agrarian innovations]*, 11, 60–67. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2022.11.8> [in Ukrainian].

Shtakal, M., Holyk, L., Levchenko, O., Shpakovych, I., & Ivashchenko, S. (2022). Otsynuyannya sortiv i liniy pshenytsi ozymoyi za stabilnoyu vrozhaynistyu ta adaptivnistyu v umovakh zminy klimatu Lisostepu [Assessment of winter wheat varieties and lines for stable yield and adaptability in the conditions of Forest-Steppe climate change]. *Visnyk ahrarnoyi nauky [Bulletin of Agricultural Science]*, 3 (828), 62–69. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202203-08> [in Ukrainian].

Intsar, H.H., Wahid, S.A., Al-Abodi, H.M.K., Abdullah, S., Mahamud, R., & Hossain, B. (2019). Grain yield and quality of wheat as affected by cultivars and seeding rates. *Malaysian Journal of Sustainable Agriculture*, 3 (1), 8–12. <https://doi.org/10.26480/mjsa.01.2019.08.12> [in English].

Hasanova, I., Yerashova, M., Nozdrina, N., Pedash, O., & Kulyk, A. (2023). Efficiency of winter wheat cultivation after spring barley in the Northern Steppe of Ukraine. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, LXVI (2), 243–250 [in English].

Korkhova, M., Smirnova, I., Panfilova, A., & Bilichenko, O. (2023). Productivity of winter wheat depending on varietal characteristics and pre-sowing treatment of seeds with biological products. *Scientific Horizons*, 26(5), 65–75. <https://doi.org/10.48077/scihor5.2023.65> [in English].

Sallam, M., Ghazy, A., Al-Doss, A., & Al-Ashkar, I. (2024). Combining Genetic and Phenotypic Analyses for Detecting Bread Wheat Genotypes of Drought Tolerance through Multivariate Analysis Techniques. *Life*, 14, 183. <https://doi.org/10.3390/life14020183> [in English].

Solodushko, M.M., Gasanova, I.I., Yaroshenko, S.S., Pedash, O.O., Drumova, O.M., Astakhova, Ya.V., Yerashova, M.V., & Bezsusidnya, Yu.V. (2021). Effect of mineral nutrition on winter wheat yield after sunflower in Ukrainian steppe zone. *Ukrainian Journal of Ecology*, 11 (7), 179–184. https://doi.org/10.15421/2021_256 [in English].

Twizerimana, A., Niyigaba, E., Mugenzi, I., Ngnadong, W. A., Li, C., Hao, T.Q., & Hai, J.B. (2020). The Combined Effect of Different Sowing Methods and Seed Rates on the Quality Features and Yield of Winter Wheat. *Agriculture*, 10 (5), 153. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050153> [in English].

Отримано: 25.04.2025
Прийнято: 15.05.2025



УДК 631.53:633.2(477.83/.86)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.16>

ВПЛИВ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЇ НА ОСОБЛИВОСТІ ВИРОЩУВАННЯ СІДИ БАГАТОРІЧНОЇ В УМОВАХ ЗАХІДНОГО РЕГІОНУ УКРАЇНИ

Т. І. Дмитраш¹, Я. Я. Григорів²

Вичерпання традиційних джерел енергії та підвищення цін на енергетичні ресурси істотно ускладнюють формування конкурентоспроможної собівартості продукції аграрного і промислового секторів, що, своєю чергою, знижує їхні позиції на світових ринках. У зв'язку із цим стратегічним пріоритетом державної політики виступає раціональне використання наявного паливно-енергетичного потенціалу країни, а також диверсифікація джерел енергоносіїв і маршрутів їх постачання.

Актуальність дослідження пов'язана з необхідністю розширення використання відновлювальних джерел енергії в Україні, зокрема біомаси, для зменшення залежності від викопного палива. Метою роботи є вивчення впливу різних агротехнічних заходів, зокрема доз мінеральних добрив і біостимуляторів, на продуктивність сіди багаторічної як джерела біомаси для енергетичних потреб.

Методи дослідження включали польові експерименти на дерново-підзолистому ґрунті з різними варіантами внесення добрив і біостимуляторів.

Встановлено, що формування надземної маси сіди багаторічної, зокрема її висоти, залежить від морфологічних особливостей сорту, гідротермічних умов і агротехнологічних прийомів, зокрема від застосування добрив. Результати показали, що комбіноване застосування мінеральних добрив у дозі $N_{30}P_{30}K_{30}$ разом із біостимулятором Інтермаг Титан забезпечує найбільший приріст рослин за висотою та діаметром стебла, що сприяє підвищенню біомасової продуктивності культури. Наукова новизна дослідження полягає в оцінюванні синергетичного ефекту мінеральних добрив і біостимуляторів для поліпшення морфологічних характеристик сіди багаторічної. Практична значущість отриманих результатів полягає в можливості застосування визначених агротехнічних заходів для підвищення ефективності вирощування енергетичних культур в Україні, що відкриває нові перспективи для використання біомаси в енергетичному секторі.

Ключові слова: біомаса, сіда багаторічна, мінеральні добрива, Інтермаг Титан, енергетичні культури, агротехнічні заходи, відновлювальні джерела енергії.

¹ аспірант кафедри лісового і аграрного менеджменту
(Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ)
e-mail: taras.dmytrash.22@pnu.edu.ua
ORCID: 0009-0007-2536-0909

² кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри лісового і аграрного менеджменту
(Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ)
e-mail: slava.hryhoriv@pnu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-5892-9483

THE IMPACT OF TECHNOLOGICAL ELEMENTS ON THE FEATURES OF GROWING PERENNIAL SWITCHGRASS IN THE CONDITIONS OF THE WESTERN REGION OF UKRAINE

T. I. Dmytrash, Y. Y. Hryhoriv

The depletion of traditional energy sources and the rising cost of energy resources significantly complicate the formation of a competitive cost structure for products in the agricultural and industrial sectors, which in turn undermines their positions in global markets. In this context, a strategic priority of national policy is the rational use of the country's existing fuel and energy potential, as well as the diversification of energy sources and supply routes.

The relevance of the research lies in the need to expand the use of renewable energy sources in Ukraine, particularly biomass, in order to reduce dependence on fossil fuels.

The aim of the study is to investigate the impact of various agrotechnical measures, including the application rates of mineral fertilizers and biostimulants, on the productivity of perennial sida as a biomass source for energy purposes.

The research methods included field experiments on sod-podzolic soil with different fertilizer and biostimulant application schemes.

It was found that the formation of above-ground biomass in perennial sida, particularly plant height, depends on the morphological characteristics of the cultivar, hydrothermal conditions, and agronomic practices, especially fertilizer application. The results showed that the combined use of mineral fertilizers at a rate of $N_{30}P_{30}K_{30}$ together with the biostimulant Intermag Titan provides the greatest increase in plant height and stem diameter, thereby enhancing the biomass productivity of the crop.

The scientific novelty of the study lies in the evaluation of the synergistic effect of mineral fertilizers and biostimulants on the improvement of morphological traits in perennial sida. The practical significance of the obtained results is the potential application of the identified agrotechnical measures to improve the efficiency of growing energy crops in Ukraine, opening new prospects for the use of biomass in the energy sector.

Key words: biomass, perennial switchgrass, mineral fertilizers, Intermag Titan, energy crops, agronomic practices, renewable energy sources.

Вступ

В умовах воєнного стану проблеми з енергоносіями суттєво ускладнюють не лише економічну ситуацію в Україні, впливають на довкілля та добробут населення, а й поглиблюють залежність країни від імпортного енергопостачання. Це зумовлює необхідність активного пошуку альтернативних джерел енергії (Рижук та ін., 2002; Гелетука та ін., 2014).

Україна володіє значним потенціалом щодо використання різних типів відновлювальних джерел енергії (далі – ВДЕ), зокрема гідроенергії, енергії вітру та сонця. Незважаючи на це, їхня частка в енергопостачанні країни поки що не перевищує 0,5% (0,7 млн т у. п.). Для порівняння, глобальне споживання біомаси як палива становить приблизно 2 млрд т у. п., що відповідає майже 14% загального споживання енергоресурсів. Така статистика свідчить про високу залежність економіки від викопного палива, але водночас підкреслює актуальність і перспективність розвитку відновлюваної енергетики (Гелетука та ін., 2010; Directive ..., 2009).

Біомаса забезпечує майже 80% загального обсягу енергії, отриманої з відновлюваних джерел, і залишається ключовим і найбільш перспективним заміником викопного палива. Її значущість пояснюється універсальністю: з біомаси можна отримувати паливо в різних агрегатних станах – твердому, рідкому та газоподібному, а також виробляти енергію в будь-якій формі (Гелетука та ін., 2010; Титко і Калініченко, 2010).

Розрахунки свідчать про значний потенціал України у сфері виробництва рослинної біомаси для енергетичних потреб: теоретичний обсяг біомаси оцінюється майже в 50 млн т у. п., з яких економічно доцільно використовувати від 2 до 27 млн т. Зокрема, потенціал вирощування нетрадиційних трав'янистих багаторічних енергетичних культур – як-от сільфія, топінамбур, міскантус, сіда багаторічна тощо – становить приблизно 0,60 та 0,35 млн т відповідно (Кургак та ін., 2013; Kurhak et al., 2021).

У більшості європейських країн спостерігається активний розвиток виробництва енергії з відновлювальних джерел,

зокрема з біомаси. У розвинених країнах Європи частка біомаси у структурі загального енергоспоживання досягає 20% (Розпорядження ..., 2020).

Використання новітніх високопродуктивних трав'янистих енергетичних культур, які нині є малопоширеними в аграрному секторі України, відкриває значні перспективи для виробництва енергії. Обсяг теплової енергії, що може бути отриманий з 1 га енергетичних культур, варіюється залежно від виду рослин (Кургак і Ткаченко, 2016; Hryhoriv et al., 2024). Серед трав'янистих культур найбільший енергетичний потенціал для виробництва твердого палива демонструють сіда багаторічна та міскантус (Гелетука та ін., 2010).

Доцільно впроваджувати у вирощування не лише традиційні, але й малопоширені енергетичні культури, як-от свербіга, сорго багаторічне, сільфій і сіда. Ці рослини здатні ефективно використовуватись упродовж від 6–8 до 17–20 років, щорічно забезпечувати врожайність до 30 т/га абсолютно сухої речовини. Їх вирощування не потребує значних енергетичних і матеріальних ресурсів. Зазначені культури вирізняються здатністю до багаторазового формування надземної біомаси протягом вегетаційного періоду, високим коефіцієнтом насінневого розмноження, а також стійкістю до хвороб, шкідників і бур'янів (Petrychenko et al., 2014).

У закладанні енергетичних плантацій важливим чинником є правильний вибір виду або сорту, адаптованого до конкретних ґрунтово-кліматичних умов (Особливості ..., 2011; Гелетука і Желєзна, 2014; Романчук та ін., 2014). За сприятливих умов урожайність таких культур може досягати 20–40 т сухої біомаси з гектара щороку (Рахметов, 2011).

У процесі вилучення із сільськогосподарського використання земель, що розташовані в ерозійно небезпечних агроландшафтах (під природні кормові угіддя або заліснення), частину таких площ доцільно використовувати для вирощування багаторічних трав'янистих культур, зокрема малопоширених. Вони не лише ефективно запобігають ерозійним процесам, а й слугують перспективним джерелом біосировини для виробництва твердого біопалива (брикетів, пелет тощо) у сільських регіонах (Кургак та ін., 2013; Petrychenko et al., 2014; Кургак і Ткаченко, 2016; Kurhak et al., 2021).

Метою нашої роботи є визначення впливу умов вирощування на продуктивність і врожайність фітомаси сіди багаторічної.

Матеріал і методи

Ми провели польовий дослід на дослідному полігоні кафедри лісового і аграрного менеджменту Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника протягом 2024 р. за загальноприйнятими методиками. Ґрунт був дерново-підзолистий, поверхнево оглеєний, важкосуглинковий, із крупнопилуватою структурою. Параметри кислотності (pH) – 4,5, вміст гумусу – 2,7%, а забезпеченість ґрунту за елементами живлення (мг/кг) була такою: азот – 77,0, фосфор – 42,0, калій – 100,0. Варіанти були розміщені систематично, із чотирикратною повторністю.

Агротехнічні заходи в досліді відповідали рекомендованим для західної частини України на час проведення досліджень, за винятком агротехнічного заходу, що був передбачений схемою досліді для вивчення, а саме доз мінеральних добрив.

Облікова площа окремої ділянки – 50 м². Для проведення дослідження був використаний сорт сіди багаторічної Вірджинія. Схема досліді:

- контроль (без внесення добрив) + обробка водою;
- N₃₀P₃₀K₃₀;
- Блек Джек КС;
- Інтермаг Титан;
- N₃₀P₃₀K₃₀ + Блек Джек КС;
- N₃₀P₃₀K₃₀ + Інтермаг Титан.

Облік кількісних показників сіди багаторічної здійснювався протягом вегетаційного періоду рослин. Отримані дані досліджень, апробовані в експерименті, оброблялися за сучасними статистичними методами з використанням комп'ютерних програм "Excel" і "Statistica 6.0".

Результати та їх обговорення

Одним із ключових чинників виробництва природної біосировини є обмеженість основних засобів як за кількістю, так і за якістю. Ці ресурси не підлягають заміщенню, оскільки на них не поширюється дія закону заміщення. Їх збереження та раціональне використання є не лише запорукою економічного розвитку, а й необхідною умовою для забезпечення сприятливого середовища життя людини.

Для розроблення сучасних технологій вирощування рослин необхідно досліджувати закономірності їхнього росту, розвитку та формування врожаю, його якості під впливом агротехнічних заходів, як-от доза мінеральних добрив. Формування надземної маси сіди багаторічної, зокрема її висоти,

залежить від морфологічних особливостей сорту, гідротермічних умов і агротехнологічних прийомів, зокрема від застосування добрив.

Фенологічні спостереження, здійснені в межах нашого дослідження, засвідчили сприятливий вплив мінеральних добрив і біостимуляторів на ключові морфологічні характеристики сіди багаторічної. Установлено, що застосування цих агротехнічних засобів позитивно позначається, зокрема, на рості рослин (рис. 1).

Максимальна висота рослин, яка досягла 158,5 см, була зафіксована за внесення азотних добрив у дозі $N_{30}P_{30}K_{30}$ разом з Інтермаг Титан. Зниження дози азотного живлення до $N_{30}P_{30}K_{30}$ призвело до зменшення висоти рослин до 143,5 см. Найменша висота (96,2 см) спостерігалась на контролі без застосування добрив.

Висота рослин сіди багаторічної тісно пов'язана з рівнем мінерального живлення та використанням біостимуляторів і мікродобрив. Максимальні показники спостерігались за поєднаного внесення мінеральних добрив із препаратом Інтермаг Титан, що свідчить про синергетичний ефект агротехнологічних заходів на біометричні параметри культури.

Наступним вагомим морфологічним показником, що характеризує продуктив-

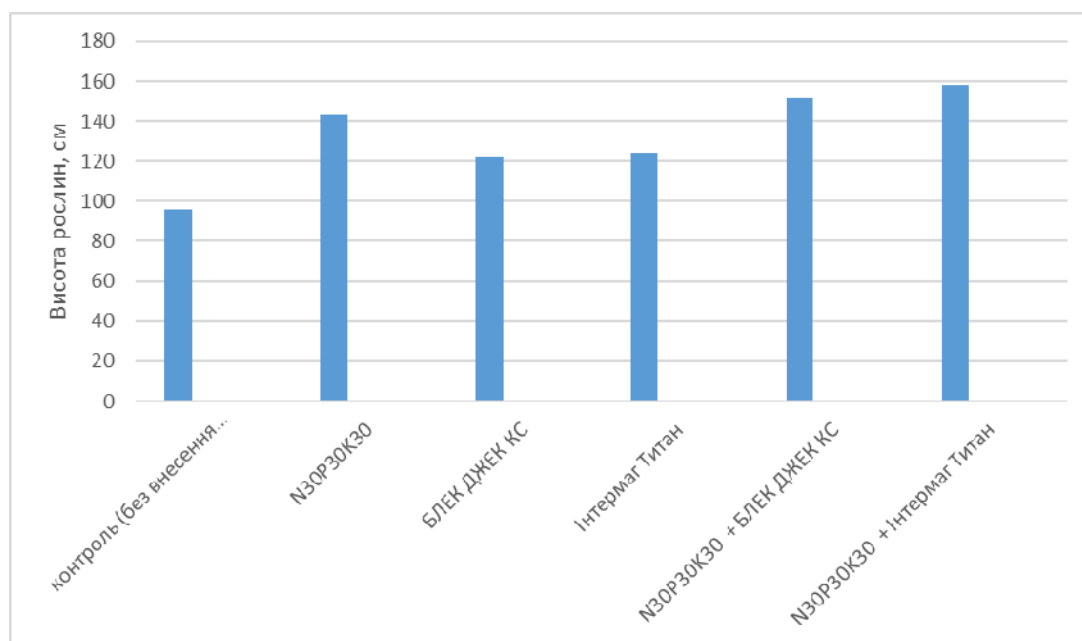
ний потенціал культури, є діаметр стебла. У сіди багаторічної цей показник коливається в межах від 0,5 до 3,5 см.

Згідно з результатами досліджень, середній діаметр стебла сіди багаторічної біля основи за варіантами досліду варіював у межах 1,6–5,8 см, за достовірної різниці (HP_{05}) – 0,33 см (рис. 2).

Найменший діаметр (1,6 см) спостерігається в контролі без унесення добрив, що свідчить про недостатній розвиток рослин за умов нестачі поживних елементів. Унесення мінеральних добрив у дозі $N_{30}P_{30}K_{30}$ зумовило помітне збільшення товщини стебла до майже 4 см. Застосування лише мікродобрив (Блек Джек КС або Інтермаг Титан) забезпечило дещо менший приріст діаметра, порівняно з мінеральним живленням.

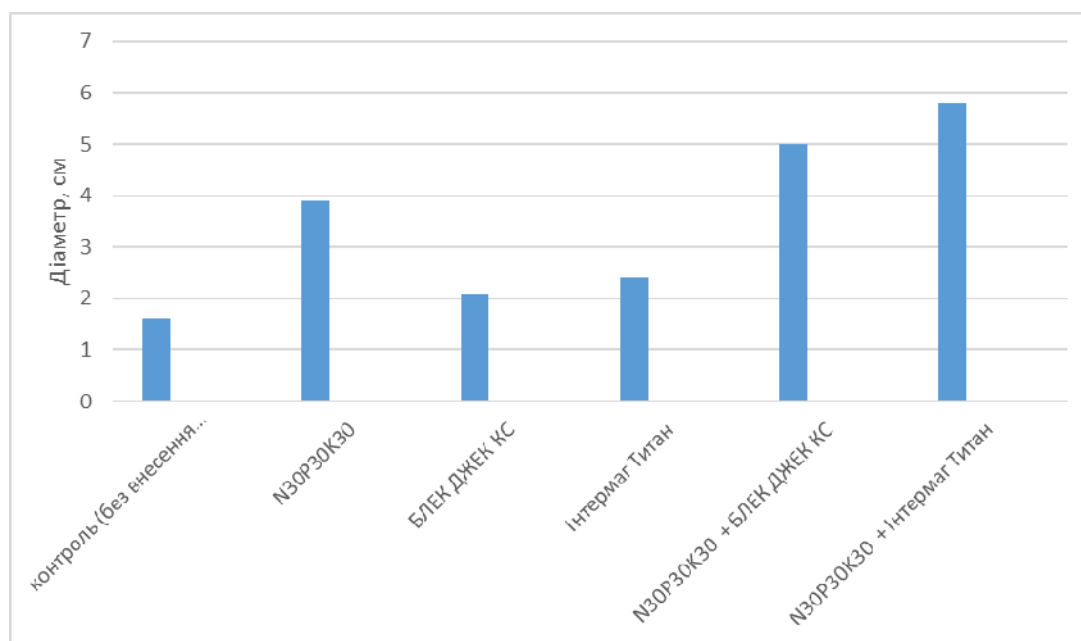
Максимальні показники (понад 5 см) були зафіксовані у варіантах комбінованого удобрення: $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Блек Джек КС, особливо $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан (майже 6 см), що свідчить про синергетичний ефект комплексного внесення мінеральних добрив і мікроелементів.

Наші результати досліджень підтверджуються науковою роботою М.В. Радченка, який проводив подібні дослідження на базі Навчально-наукового виробничого центру Сумського НАУ та встановив, що найсприятливіші умови для росту, розвитку



HP_{05} – 3,1.

Рис. 1. Висота рослин сіди багаторічної залежно від системи удобрення (середнє за 2024 р.)



$HP_{05} - 0,33$.

Рис. 2. Діаметр рослин сіди багаторічної залежно від системи удобрення (середнє за 2024 р.)

та формування врожаю були відзначені за варіанту внесення азотних мінеральних добрив у нормі 60 кг/га діючої речовини. Саме за цієї дози було зафіксовано максимальні показники приросту висоти рослин – 258,6 см, а також найбільший діаметр стебла – 9,8 мм (Радченко, 2022).

Отже, діаметр стебла сіди багаторічної істотно залежить від рівня мінерального живлення. Найбільші значення спостерігались у разі комплексного застосування $N_{30}P_{30}K_{30}$ з мікродобривами, що підтверджує доцільність поєднання основного та позакореневого живлення для забезпечення високої біомасової продуктивності культури.

Кількість листків на одній рослині безпосередньо залежить від її висоти та щільності стояння на одиниці площі, а в сукупності з довжиною прапорцевого листка є одним із визначальних чинників формування врожайності зеленої біомаси сіди багаторічної (рис. 3). Отже, створення умов для формування максимальної кількості листків сприятиме підвищенню продуктивності культури. Упровадження раціональних елементів технології вирощування забезпечує можливість впливу на листову поверхню рослин, отже, підвищення врожайності фітомаси.

У результаті досліджень встановлено, що максимальна кількість листків у період

вегетації формувалася за умови застосування мінерального добрива в дозі $N_{30}P_{30}K_{30}$ у поєднанні із препаратом Інтермаг Титан – 28,6 шт./рослину. Найменший показник спостерігався в контрольному варіанті без удобрення – 18,1 шт./рослину. За внесення лише мінерального добрива $N_{30}P_{30}K_{30}$ кількість листків становила 22,1 шт./рослину.

Так, встановлено, що найменші значення всіх показників спостерігалися в контрольному варіанті без застосування добрив: кількість листків – приблизно 18 шт., довжина – 6 см, ширина – 4 см.

Застосування добрива $N_{30}P_{30}K_{30}$ забезпечило зростання кількості листків до 22 шт., що супроводжувалося збільшенням довжини та ширини листків. Комбінації мінеральних добрив з мікродобривами Блек Джек КС та Інтермаг Титан сприяли подальшому покращенню морфологічних характеристик листків.

Найвищі показники зафіксовано у варіанті з унесенням $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан: 29 листків на стеблі, довжина – приблизно 9 см, ширина – понад 6 см.

Отже, застосування мінеральних добрив, особливо в поєднанні з мікродобривами, позитивно впливає на розвиток листового апарату сіди багаторічної. Найкращі результати за всіма морфологічними ознаками отримано за внесення добрива $N_{30}P_{30}K_{30}$ у поєднанні

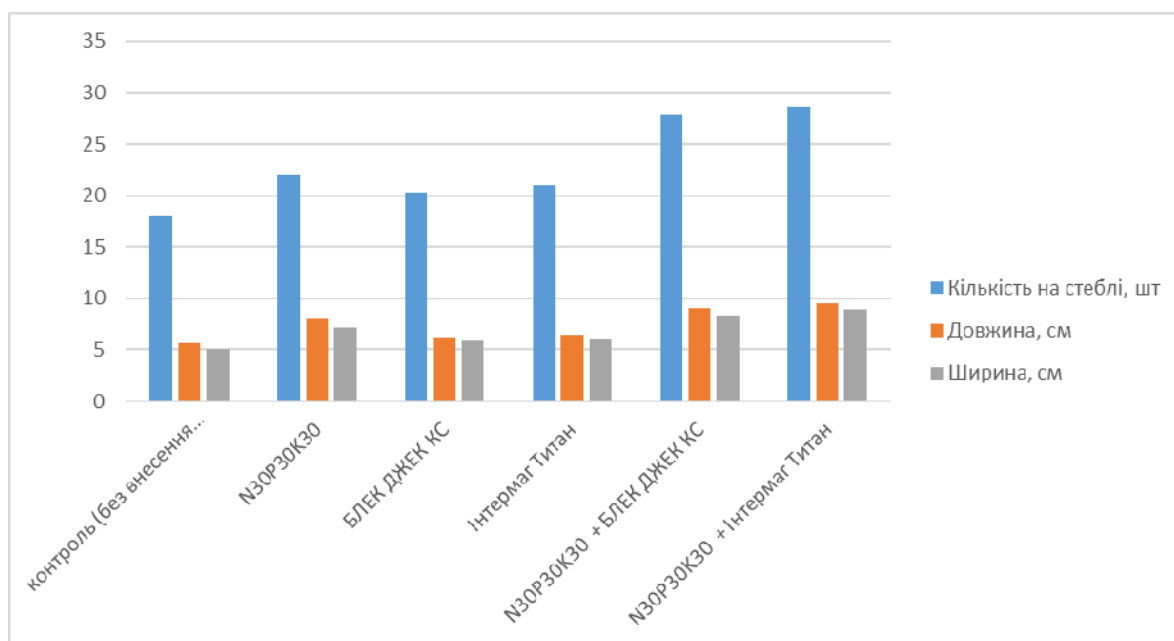


Рис. 3. Морфологічні показники сіди багаторічної залежно від системи удобрення (середнє за 2024 р.)

з Інтермаг Титан, що свідчить про доцільність використання даного агротехнічного прийому для підвищення продуктивності культури.

Висновки

Використання мікродобрив і мінеральних добрив сприяло збільшенню висоти рослин сорго. Результати досліджень показали,

що оптимальні умови для росту, розвитку та формування за умови застосування мінерального добрива в дозі $N_{30}P_{30}K_{30}$ у поєднанні із препаратом Інтермаг Титан. За цієї комбінації добрив відзначено найбільший приріст рослин за висотою – 158,5 см, а також діаметр стебла – 5,8 мм.

Список використаної літератури

- Гелетука Г.Г., Железна Т.А. Перспективи використання відходів сільського господарства для виробництва енергії в Україні. *Аналітична записка Біоенергетичної асоціації України*. 2014. № 7. С. 12–16.
- Гелетука Г.Г., Железна Т.А., Жовмір М.М., Матвєєв Ю.Б., Дроздова О.І. Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні. *Промислова теплотехніка*. 2010. Т. 32. № 6. С. 58–65.
- Гелетука Г.Г., Железна Т.А., Кучерюк П.П., Олійник Є.М. Сучасний стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні. *Аналітична записка Біоенергетичної асоціації України*. 2014. № 9. С. 9–10.
- Кургак В.Г., Левковський А.М., Єфремова Г.В., Лещенко О.Ю. Біоенергетичний потенціал багаторічних трав'янистих фітоценозів України. *Збірник наукових праць Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків Національної академії аграрних наук України*. 2013. Вип. 19. С. 63–67.
- Кургак В.Г., Ткаченко А.М. Біоенергетичний потенціал багаторічних трав'янистих фітоценозів. *Вісник аграрної науки*. 2016. № 2. С. 15–20.
- Особливості технологічного забезпечення вирощування сільськогосподарських культур в умовах 2001 р. у Степовій зоні України. Дніпропетровськ : Роял-Принт, 2011. 96 с.
- Про Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 р. : розпорядження № 902-р від 1 жовтня 2014 р. / Кабінет Міністрів України. Київ, 2014.
- Радченко М.В. Особливості вирощування сіди багаторічної залежно від елементів технології. *Аграрні інновації: Меліорація, землеробство, рослинництво*. 2022. № 16. С. 66–69. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2022.16.11>.

Рахметов Д.Б. Теоретичні та прикладні аспекти інтродукції рослин в Україні : монографія. Київ : Аграр Медіа Груп, 2011. 398 с.

Рижук С.М., Слюсар І.Т., Вергунов В.А. Агроекологічні особливості високоефективного використання осушуваних торфових ґрунтів Полісся і Лісостепу. Київ : Аграрна наука, 2002. 136 с.

Романчук Л.Д., Зінченко В.О., Василюк Т.П. Перспективи розвитку альтернативної енергетики на Поліссі України. Житомир, 2014. 81 с.

Титко Р., Калініченко В.М. Відроджувальні джерела енергії: досвід Польщі для України. Варшава : QWG, 2010. С. 401–455.

Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. *Official Journal of the European Union*. L 140. 5.6.2009. P. 16–62.

Hryhoriv Ya., Butenko Ye., Kabanets V., Filon V., Kriuchko L., Bondarieva L., Mikulina M., Yevtushenko Ye., Polyvanyi A., Kovalenko V. Prospectives of Growing Energy Crops for the Production of Different Types of Biofuel. *Ecological Engineering and Environmental Technology*. 2024. № 25 (5). P. 191–197. <https://doi.org/10.12912/27197050/185710>.

Kurgak V.G., Panasyuk S.S., Asanishvili N.M. et. al. Influence of perennia legume son the productivity of meadow phytocenoses. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020. № 6. P. 310–315. https://doi.org/10.15421/2020_298.

Kurhak V.H., Tkachenko M.A., Asanishvili N.M. Energy productivity of uncommon herbs for solid fuel manufacturing. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2021. № 1. P. 299–305. https://doi.org/10.15421/2021_45.

Petrychenko V., Kurgak V., Rybak S. Bioenergy potential of meadows of Ukraine. EGF at 50: The Future of European Grasslands / Pr. of 25th Gen. Meeting of the Europ. Grassland Federation. Aberystwyth, Wales. 2014. P. 143–145.

References

Heletukha, H.H., & Zhelezna, T.A. (2014). Perspektyvy vykorystannia vidhodiv silskoho hospodarstva dlia vyrobnytstva enerhii v Ukraini [Prospects for using agricultural waste for energy production in Ukraine]. *Analitichna zapyska BAU [Analytical Note of the Bioenergy Association of Ukraine]*, 7, 12–16 [in Ukrainian].

Heletukha, H.H., Zheliezna, T.A., Zhovmir, M.M., Matvieiev, Yu.B., & Drozdova, O.I. (2010). Otsinka enerhetychnoho potentsialu biomasy v Ukraini [Assessment of the biomass energy potential in Ukraine]. *Promyslova teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]*, 32(6), 58–65 [in Ukrainian].

Heletukha, H.H., Zhelezna, T.A., Kucheriuk, P.P., & Oliinyk, Ye.M. (2014b). Suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku bioenerhetyky v Ukraini [Current state and development prospects of bioenergy in Ukraine]. *Analitichna zapyska BAU [Analytical Note of the Bioenergy Association of Ukraine]*, 9, 9–10 [in Ukrainian].

Kabinet Ministriv Ukrainy (2014, October 1). Rozporiadzhennia № 902-r. Pro Natsionalnyi plan dii z vidnovliuvanoi enerhetyky na period do 2020 roku [Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 902-r. On the National Renewable Energy Action Plan until 2020]. Kyiv [in Ukrainian].

Kurhak, V.H., Levkovskiy, A.M., Yefremova, H.V., & Leshchenko, O.Yu. (2013). Bioenerhetychnyi potentsial bahatorichnykh travianystrykh fitotsenoziv Ukrainy [Bioenergy potential of perennial herbaceous phytocenoses in Ukraine]. *Zbirnyk naukovykh prats Instytutu bioenerhetychnykh kultur i tsukrovykh buriakiv NAAAN [Collection of scientific papers of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beets NAAS]*, 19, 63–67 [in Ukrainian].

Kurhak, V.H., & Tkachenko, A.M. (2016). Bioenerhetychnyi potentsial bahatorichnykh travianystrykh fitotsenoziv [Bioenergy potential of perennial herbaceous phytocenoses]. *Visnyk ahrarnoi nauky [Bulletin of Agricultural Science]*, 2, 15–20 [in Ukrainian].

Osoblyvosti tekhnolohichnoho zabezpechennia vyroshchuvannia silskohospodarskykh kultur v umovakh 2001 roku v Stepovii zoni Ukrainy (2011). [Technological support features for crop cultivation in the Steppe zone of Ukraine in 2001]. Dnipro : Royal-Print [in Ukrainian].

Radchenko, M.V. (2022). Osoblyvosti vyroshchuvannia sidy bahatorichnoi zalezho vid elementiv tekhnolohii [Cultivation features of perennial Sida depending on technology elements]. *Ahrarni innovatsii: Melioratsiia, zemlerobstvo, roslыnnystvo [Agrarian Innovations: Reclamation, Agriculture, Crop Production]*, 16, 66–69. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2022.16.11> [in Ukrainian].

Rakhmetov, D.B. (2011). Teoretychni ta prykladni aspekty introduktsii roslyn v Ukraini: monohrafiia [Theoretical and applied aspects of plant introduction in Ukraine: Monograph]. Kyiv : Ahrar Media Group [in Ukrainian].

Ryzhuk, S.M., Sliusar, I.T., & Verhunov, V.A. (2002). Ahroekologichni osoblyvosti vysokoeffektivnoho vykorystannia osushuvalnykh torfovykh rruntiv Polissia i Lisostepu [Agroecological features of effective use of drained peat soils of Polissia and Forest-Steppe]. Kyiv : Ahrarna nauka [in Ukrainian].

Romanchuk, L.D., Zinchenko, V.O., & Vasiliuk, T.P. (2014). Perspektyvy rozvytku alternatyvnoi enerhetyky na Polissi Ukrainy [Prospects for the development of alternative energy in Ukrainian Polissia]. Zhytomyr [in Ukrainian].

Tytko, R., & Kalinichenko, V. (2010). Vidnovliuvalni Dzherela Enerhii (Dosvid Polshchi dlia Ukrainy) [Renewable Energy Sources (Polish experience for Ukraine)]. Warsaw : QWG, pp. 401–455 [in Ukrainian].

Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. *Official Journal of the European Union*, L 140, 5.6.2009, 16–62 [in English].

Hryhoriv, Ya., Butenko, Ye., Kabanets, V., Filon, V., Kriuchko, L., Bondarieva, L., Mikulina, M., Yevtushenko, Ye., Polyvanyi, A., & Kovalenko, V. (2024). Prospectives of growing energy crops for the production of different types of biofuel. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 25 (5), 191–197. <https://doi.org/10.12912/27197050/185710> [in English].

Kurgak, V.G., Panasyuk, S.S., Asanishvili, N.M., et al. (2020). Influence of perennial legumes on the productivity of meadow phytocenoses. *Ukrainian Journal of Ecology*, 6, 310–315. https://doi.org/10.15421/2020_298 [in English].

Kurhak, V.H., Tkachenko, M.A., & Asanishvili, N.M. (2021). Energy productivity of uncommon herbs for solid fuel manufacturing. *Ukrainian Journal of Ecology*, 1, 299–305. https://doi.org/10.15421/2021_45 [in English].

Petrychenko, V., Kurgak, V., & Rybak, S. (2014). Bioenergy potential of meadows of Ukraine. In *EGF at 50: The Future of European Grasslands. Proceedings of the 25th General Meeting of the European Grassland Federation*, Aberystwyth, Wales, pp. 143–145 [in English].

Отримано: 24.04.2025
Прийнято: 11.02.2025



УДК 57.047:631.872(477.41/.42)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.17>

ВПЛИВ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ОМАНУ ВИСОКОГО *INULA HELENIUM* L. В УМОВАХ ПОЛІССЯ УКРАЇНИ

Г. Є. Киричук¹, М. М. Світельський², О. В. Ішук³, В. З. Панчишин⁴

У сучасних умовах зростаючого попиту на лікарські рослини особливого значення набуває розробка ефективних агротехнологій вирощування цінних видів, зокрема омани високого (*Inula helenium* L.). Ця багаторічна рослина родини айстрових містить цінні біологічно активні речовини (інулін, ефірні олії, алантолактон), що зумовлює її широке застосування у фармацевтичній, косметичній і ветеринарній галузях.

Метою дослідження було вивчення впливу різних норм мінеральних добрив ($N_{30}P_{30}K_{30}$ та $N_{60}P_{60}K_{60}$) на продуктивність омани високого в умовах Полісся України. Польові експерименти проводилися на агробіостанції Житомирського державного університету імені Івана Франка протягом 2015–2022 років. Дослідження передбачали оцінку морфометричних показників рослин, динаміки наростання біомаси та врожайності коренів, зеленої маси й насіння.

Результати досліджень показали, що внесення мінеральних добрив суттєво покращувало показники росту та розвитку рослин. Наприкінці першого року вегетації висота рослин на контрольному варіанті (без добрив) становила 23,0 см, тоді як за внесення $N_{30}P_{30}K_{30}$ цей показник зріс до 25,0 см, а за $N_{60}P_{60}K_{60}$ – до 26,0 см. Площа листової поверхні збільшилася з 16,4 см² на контролі

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

² кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри ботаніки, біоресурсів і збереження біорізноманіття
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: svitmm71@ukr.net
ORCID: 0000-0003-1501-4168

³ кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: ischuk_o@ukr.net
ORCID: 0000-0002-8993-8366

⁴ кандидат сільськогосподарських наук, доцент
доцент кафедри ботаніки, біоресурсів і збереження біорізноманіття
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
E-mail: panch22@ukr.net
ORCID: 0000-0001-5256-5052

до 24,3 см² за внесення подвійної дози добрив. Маса коренів на одну рослину зростала з 16,4 до 19,1 г залежно від варіанта удобрення.

Найбільш ефективною виявилася доза $N_{30}P_{30}K_{30}$, яка забезпечила достовірне збільшення врожаю повітряно-сухих коренів на 3,37 ц/га (55,2 % до контролю), зеленої маси – на 70,1 ц/га (29,4 %) та насіння – на 1,42 ц/га (86,1 %). Подвійна доза добрив ($N_{60}P_{60}K_{60}$) не завжди демонструвала пропорційне збільшення ефективності, що свідчить про доцільність використання помірних норм удобрення.

Окрему увагу приділено вивченню оптимальної густоти стояння рослин. Встановлено, що максимальна продуктивність досягалася за густоти 110 тис. рослин/га із шириною міжрядь 45 см.

Такі насадження формували врожай повітряно-сухих коренів на рівні 23,5 ц/га, що на 5,4 ц/га перевищувало показники за густоти 60 тис. рослин/га.

Результати дослідження мають важливе практичне значення для розробки ресурсозберігаючих технологій вирощування оману високого. Вони доводять ефективність застосування мінеральних добрив у нормі $N_{30}P_{30}K_{30}$, що дає змогу отримати значний приріст врожаю за оптимальних витрат. Отримані дані можуть бути використані для вдосконалення агротехніки вирощування цієї цінної лікарської культури в умовах Полісся та подібних за кліматичними умовами регіонів.

Ключові слова: *Inula helenium* L., мінеральні добрива, продуктивність, урожайність, густота стояння рослин, технології вирощування.

THE INFLUENCE OF MINERAL FERTILIZERS ON THE PRODUCTIVITY OF ELECAMpane (*INULA HELENIUM* L.) IN THE POLISSYA REGION OF UKRAINE

G. E. Kyrychuk, M. M. Svitelsky, O. V. Ishchuk, V. Z. Panchyshyn

*In modern conditions of growing demand for medicinal plants, the development of effective cultivation technologies for valuable species, particularly elecampane (*Inula helenium* L.), becomes especially important. This perennial plant of the Asteraceae family contains valuable biologically active compounds (inulin, essential oils, alantolactone), which determine its wide application in pharmaceutical, cosmetic, and veterinary fields.*

The study aimed to investigate the effect of different mineral fertilizer rates ($N_{30}P_{30}K_{30}$ and $N_{60}P_{60}K_{60}$) on elecampane productivity in the Polissya region of Ukraine. Field experiments were conducted at the agrobiological station of Zhytomyr Ivan Franko State University from 2015 to 2022. The research included evaluation of plant morphometric parameters, biomass accumulation dynamics, and yields of roots, green mass, and seeds.

The results demonstrated that mineral fertilizer application significantly improved plant growth and development indicators. At the end of the first vegetation year, plant height in the control (without fertilizers) was 23.0 cm, while with $N_{30}P_{30}K_{30}$ application it increased to 25.0 cm, and with $N_{60}P_{60}K_{60}$ – to 26.0 cm. Leaf area expanded from 16.4 cm² in control to 24.3 cm² with double fertilizer dose. Root mass per plant increased from 16.4 to 19.1 g depending on fertilization treatment.

The $N_{30}P_{30}K_{30}$ dose proved to be most effective, providing reliable increases in air-dried root yield by 3.37 t/ha (55.2% compared to control), green mass by 70.1 t/ha (29.4%), and seeds by 1.42 t/ha (86.1%). The double fertilizer dose ($N_{60}P_{60}K_{60}$) didn't always show proportional efficiency growth, indicating the advisability of using moderate fertilization rates.

Special attention was paid to studying optimal plant density. It was established that maximum productivity was achieved with density of 110 thousand plants/ha and row spacing of 45 cm. Such plantations formed air-dried root yield at 23.5 t/ha, exceeding by 5.4 t/ha the indicators at density of 60 thousand plants/ha.

The research results have important practical significance for developing resource-saving elecampane cultivation technologies. They prove the effectiveness of using mineral fertilizers at $N_{30}P_{30}K_{30}$ rate, which allows obtaining significant yield increases at optimal costs. The obtained data can be used to improve cultivation techniques for this valuable medicinal plant in Polissya and similar climatic regions.

Key words: elecampane, *Inula helenium* L., mineral fertilizers, productivity, yield, planting density, cultivation techniques.

Вступ

Сучасне сільське господарство потребує не лише отримання високих врожаїв основних сільськогосподарських культур,

а й розвитку напрямів, пов'язаних із вирощуванням лікарських рослин, які мають значну цінність у фармацевтичній, косметичній і ветеринарній галузях. Однією

з таких перспективних культур є оман високий (*Inula helenium* L.) – багаторічна рослина родини айстрових, яка містить інулін, ефірні олії, алантолактон та інші біологічно активні речовини. Ці сполуки зумовляють його протизапальні, відхаркувальні, жовчогінні й антисептичні властивості. У відповідь на ці виклики технології вирощування лікарських рослин повинні адаптуватися до сучасних вимог агрономічної науки та потреб ринку. Проте актуальним залишається питання комплексного дослідження агротехнічних прийомів вирощування омани високого, які б забезпечили одночасно високу врожайність та якість лікарської сировини.

Традиційні методи вирощування не завжди відповідають сучасним екологічним стандартам або не враховують зміни кліматичних умов, структури ґрунтів, біотичних факторів. Це зумовлює потребу в удосконаленні технології вирощування омани високого, зокрема таких її елементів, як строки посіву, способи та норми висіву, удобрення, захист рослин, збирання та зберігання сировини. На цьому етапі актуальним є формування нових агротехнічних підходів, які сприятимуть адаптації культури до різних ґрунтово-кліматичних умов України. В умовах підвищеного попиту на натуральну продукцію вітчизняна сировинна база лікарських рослин повинна не лише задовольняти внутрішні потреби, а й бути конкурентоспроможною на міжнародному рівні.

Основним завданням є розробка й оптимізація технологій вирощування омани високого, які дадуть можливість підвищити ефективність виробництва лікарської сировини, мінімізуючи витрати й екологічний вплив. Також важливо дослідити морфобіологічні особливості культури на різних етапах онтогенезу для визначення найефективніших прийомів агротехніки. Досягнення цих цілей сприятиме раціональному використанню земельних ресурсів і забезпеченню стабільного постачання якісної сировини для фармацевтичної галузі. Цей процес потребує ретельного наукового підходу, залучення результатів польових досліджень, а також міждисциплінарної взаємодії у сфері агрономії, ґрунтознавства, фітохімії та екології.

У перспективі реалізація результатів цього дослідження стане підґрунтям для впровадження ефективної технології вирощування омани високого в умовах України, не лише забезпечуючи економічну доціль-

ність, але й сприяючи збереженню біорізноманіття та сталому розвитку аграрної галузі.

Лікарські рослини є цінним джерелом біологічно активних сполук і важливою складовою у виробництві ліків. На жаль, сучасний стан лікарського рослинництва в Україні призводить до дефіциту необхідної сировини для фармацевтичної промисловості. Оман високий є однією з небагатьох культур, чиє промислове вирощування успішно організовано в нашій країні. Однак існуючі агротехнології вирощування цієї культури мають певні аспекти, що потребують подальших наукових досліджень та удосконалення (Вожегова та ін., 2021).

Одним із них є внесення мінеральних добрив на першому році вегетації, що дає суттєві переваги: приріст біомаси, збільшення врожайності коренів, зеленої маси та насіння. Оптимальною густиною рослин для отримання максимальної продуктивності коренів, зеленої маси та насіння на другому-третьому році вегетації визначено 110 тисяч на гектар (Рахметов та ін., 2004).

Формування врожайності сільськогосподарських культур, зокрема омани високого, в умовах конкретного регіону є складним процесом, який формується під впливом взаємодії генетичних особливостей рослин і зовнішнього середовища. Досягнення максимального рівня врожайності сировини та насіння потребує глибокого розуміння значень основних агроекологічних факторів та їхньої взаємодії, а також прогнозування реакції рослин на ці умови. На рівень врожаю істотно впливають водний, повітряний, тепловий і світловий режими, особливості сорту та виду культури, умови посіву і, безумовно, рівень живлення (Коваšević, 1995). Для вирощування омани високого оптимальною глибиною заробки насіння була 0,5–1,0 см, за якої польова схожість становила 60,0–65,7 %. Продуктивність кореневої маси при цьому досягала 0,24–0,48 кг/м², а зеленої маси – 0,90–0,99 кг/м².

Оман високий характеризується невибагливістю до родючості ґрунтів, однак відзначається високою чутливістю до внесення як органічних, так і мінеральних добрив (Климчук, 2012). Їх застосування сприяє ефективнішому використанню вологи, підвищує морозостійкість рослин, зберігає і поліпшує ґрунтову родючість, а також суттєво підвищує урожайність та якість кореневої сировини (Дудченко та ін., 1989).

Це пояснюється тим, що поживні речовини у ґрунті часто перебувають у формі,

малодоступний для засвоєння через слабку фізіологічну активність кореневої системи (Stepanović et al., 2002). Із цієї причини багато науковців (Stepanović et al., 2002; Jevđović et al., 2004; Шевченко і Глущенко, 2016; Islamov et al., 2024) рекомендують застосування органо-мінеральних добрив для вирощування оману.

Залежно від біологічних властивостей культури й особливостей ґрунту добрива вносять до сівби, у рядки під час сівби або у вигляді підживлень протягом вегетації (Біленко, 2007). Основні добрива, як-от гній або його суміші з мінеральними компонентами, доцільно вносити під пар або попередник. Під основну глибоку оранку вносять на гектар 20 т перегною, по 120 кг азоту й фосфору та 60 кг калію (Лихочвор та ін., 2003). Важливо, щоб органіка була добре розкладена, оскільки в неперепрілому гної може міститися велика кількість насіння бур'янів (Шевченко і Глущенко, 2016).

При сівбі доцільно локально вносити 20–50 кг/га гранульованого суперфосфату, залежно від культури. Такий захід дає змогу підвищити врожайність лікарських культур, у тому числі оману високого, на 20–30% (Дудченко та ін., 1989).

У посівах першого року та в разі вирощування культури на кількарічній основі підживлення добривами здійснюють один-два рази за сезон, у перехідних посівах – одразу після початку весняного відростання. Особливо відчутним позитивний ефект добрив є на малородючих ґрунтах (Жарінов і Остапенко, 1994).

Для досягнення високих врожаїв важливо забезпечити помірне азотне живлення у фазі проростання насіння та на ранніх стадіях росту. У фазі активного наростання надземної маси й формування кореневої системи бажано підвищити рівень забезпеченості фосфором і калієм. А на завершальних етапах вегетації бажано обмежити внесення азоту (Рябчун та ін., 2019).

З осені ділянки, призначені для вирощування оману, рекомендується заправляти органо-мінеральною сумішшю в дозі 3–4 кг/м² перепрілого гною та 4,5–6,0 г/м² фосфорно-калійних добрив. Азотні добрива доцільно використовувати у вигляді весняних підживлень на початку відростання листків (Климчук, 2012).

Застосування мінеральних добрив у дозах $N_{90}P_{90}K_{90}$ під зяблеву оранку та підживлення у вигляді $N_{30}P_{30}K_{30}$ навесні дає змогу підвищити врожайність сировини на другий рік вегетації на 15–21 % (Котуков, 1974).

Використання органічних добрив (гній 30–40 т/га) забезпечує приріст урожаю до 25–30%. Підживлення мінеральними добривами в процесі вирощування оману високого доцільно здійснювати щорічно (Мірзоева, 2018).

Метою наших досліджень було встановити вплив мінеральних добрив на ріст, розвиток і продуктивність оману високого (*Inula helenium* L.) за умов висівання насіння під зиму з урахуванням дії різних норм внесення ($N_{30}P_{30}K_{30}$ і $N_{60}P_{60}K_{60}$) на морфологічні показники рослин, урожайність коренів, зеленої маси та насіння. Особливу увагу приділено першому та другому рокам вегетації, коли дія мінерального живлення проявляється найінтенсивніше.

Матеріал і методи

Дослідження проводилось у 2015–2022 рр. у ботанічному розсаднику на території агробіостанції Житомирського державного університету імені Івана Франка. Ботанічний розсадник має сприятливі природні умови для вирощування лікарських рослин, зокрема оману високого. Загальна площа ділянки в досліді становила 12 м², облікова – 10 м² із чотириразовим повторенням. Насіння оману високого отримали з відділу культурної флори Національного ботанічного саду імені М. М. Гришка НАН України (м. Київ), його лабораторна схожість була дуже низькою – 8–12%.

Сіяли в першій декаді квітня насінням з лабораторною схожістю 11,6%. Агротехніка в досліді загальноприйнята для дрібнонасінних однорічних і багаторічних культур, вона полягала у зяблевій оранці на 20–22 см, внесенні мінеральних добрив, передпосівній культивуції, коткуванні. Сівбу проводили згідно зі схемами дослідів овочевою сівалкою з нормою висіву насіння 5 кг/га із шириною міжрядь 60 см. Сходи були недружніми, зрідженими і з'явилися лише на 26–28-й день після сівби. Догляд за посівами полягав у дворазовому прополюванні та триразовому розпушуванні міжрядь. У перший рік вегетації оман високий утворює добре розвинену прикореневу розетку листків і лише 6–8% рослин формують генеративні органи. Цвітіння тривало 25–32 дні, досягання насіння відбувалось наприкінці серпня – на початку вересня. Оман високий може розмножуватися вегетативно, тому ми проводили весняне висаджування кореневищами довжиною 8–10 см із первинними корінцями з бруньками. Збір коренів проводили в першій декаді жовтня на другий рік вегетації.

Із метою вивчення впливу співвідношення та норм внесення мінеральних добрив на ріст і розвиток рослин у перший рік вегетації під час сівби під зиму вносили мінеральні добрива з нормою внесення $N_{30}P_{30}K_{30}$ і $N_{60}P_{60}K_{60}$. Підзимні посіви давали навесні своєчасні й порівняно дружні сходи. Рослини мали кращий розвиток, ніж у весняних посівів. Досліди закладено згідно з методикою проведення польових досліджень із лікарськими рослинами (Єщенко та ін., 2014).

Результати та їх обговорення

Результати проведених досліджень засвідчили позитивну дію мінеральних добрив на ріст і розвиток рослин у перший рік вегетації у разі сівби під зиму. За внесення мінеральних добрив у процесі вегетації збільшувалася висота рослин і кількість листків. На початку вегетації (20.04.2015) висота рослин була 2,2–2,4 см на всіх варіантах досліду, як без внесення добрив, так і з їх застосуванням. Протягом вегетації більш інтенсивний ріст і розвиток омани високого проходив на варіантах із внесенням $N_{30}P_{30}K_{30}$ і $N_{60}P_{60}K_{60}$.

Наприкінці вегетації (20.09.2015) висота рослин становила на варіанті без застосування добрив 23,0 см із кількістю листків 4,4 штуки на одній рослині, а за внесення $N_{30}P_{30}K_{30}$ висота рослин збільшилася до 25,0 см з 5,6 листка. На фоні $N_{60}P_{60}K_{60}$ висота рослин становила 26,0 см і 6 листків. Кращий ріст і розвиток проходив на варіанті, де посадку провели бруньками з коренями (10 см), висота рослин при цьому становила 34,8 см.

Мінеральні добрива значною мірою впливали на площу листової поверхні та вагу різних частин рослин. Так, на неудобреному варіанті площа листка становила 16,4 см², із внесенням $N_{30}P_{30}K_{30}$ – 20,9 см² і зі збільшенням дози мінеральних добрив середня площа листка становила 24,3 см². Маса різних органів рослин також збільшувалася із застосуванням мінеральних добрив (табл. 1).

Маса листків з однієї рослини з 6,3 г збільшилася до 8,9–11,2 г там, де застосували мінеральні добрива, а маса стебла – з 0,9 до 1,3–1,7 г, коренів – із 16,4 до 18,7–19,1 г. На варіантах, де вносили мінеральні добрива, товщина кореня на 0,15–0,25 см і маса кореня на 6,2–16,9 г була більшою, ніж на варіанті без добрив. Вихід сухих коренів становив 49,2–52,8 %.

Потрібно зазначити, що продуктивність омани високого на удобрених фонах набагато вища порівняно з варіантом без добрив. Так, на другому році вегетації врожай сирих коренів на неудобреному варіанті становив 15,3 ц/га, а на варіанті, де вносили $N_{30}P_{30}K_{30}$, – 21,4 ц/га. Зі збільшенням дози добрив до $N_{60}P_{60}K_{60}$ урожай коренів (сирих) збільшився до 29,5 ц/га (2015 рік). Урожай зеленої маси на неудобреному варіанті становив 100,2 ц/га у фазі бутонізації і 292 ц/га у фазі цвітіння. Велика різниця в урожаї зеленої маси пояснюється тим, що збирання зеленої маси ми проводили після утворення 50–60 % бутонів, а у фазі цвітіння – за 80–85 % квітучих рослин.

Урожай насіння у 2015 році був дуже низький: 0,25 ц/га на неудобреному варіанті, за внесення $N_{30}P_{30}K_{30}$ збільшився на 0,57 ц/га і на 0,77 ц/га на фоні $N_{60}P_{60}K_{60}$. Низький врожай насіння омани високого у 2015 році пояснюється тим, що збирання проводили пізно й багато насіння в кошиках осипалось. Аналогічна закономірність спостерігалась і 2016 року. Врожай сирих коренів на варіанті без добрив становив 10,4 ц/га, зеленої маси у фазі цвітіння – 243,4 ц/га. Із внесенням $N_{30}P_{30}K_{30}$ врожай повітряно сухих коренів збільшився на 3,7, зеленої маси – на 31,4 і насіння – на 1,90 ц/га. Із застосуванням подвійної дози мінеральних добрив значного впливу на його продуктивність не спостерігалось.

Урожай повітряно сухих коренів у 2017 році становив 6,0 ц/га, зеленої маси у фазі цвітіння – 180,4 ц/га, насіння – 2,8 ц/га на варіанті без добрив, а за внесення

Таблиця 1
Вплив мінеральних добрив на розвиток омани високого у разі сівби під зиму у фазу бутонізації (середнє за 2015–2017 рр.)

Варіанти досліду	Площа листка, см ²	Маса однієї рослини, г			
		листки	стебло	бутони	корені
Без добрив	16,4	6,3	4,1	0,9	16,4
$N_{30}P_{30}K_{30}$	20,1	8,9	4,3	1,3	18,7
$N_{60}P_{60}K_{60}$	24,3	11,2	6,2	1,7	19,7

$N_{30}P_{30}K_{30}$ прибавка в урожаї становила відповідно 2,1; 92,8 і 1,8 ц/га. За подвійної дози добрив прибавка урожаю повітряно сухих коренів становила 4,20, зеленої маси – 196,9, насіння – 3,00 ц/га порівняно з варіантом без добрив. За внесення мінеральних добрив продуктивність оману високого значно збільшувалась.

У середньому за три роки (2015–2017 рр.) врожай сухих коренів становив на неудо-бреному варіанті 6,10 ц/га, зеленої маси – 238,6 ц/га і насіння – 1,65 ц/га. За внесення $N_{30}P_{30}K_{30}$ врожай повітряно сухих коренів збільшився на 3,37 ц/га, зеленої маси – на 70,1 ц/га і насіння – на 1,42 ц/га (табл. 2).

Мінеральні добрива помітно вплинули на продуктивність оману високого в перший рік вегетації. За внесення $N_{30}P_{30}K_{30}$ вро-жай повітряно сухих коренів збільшився на 2,60 ц/га і зеленої маси на 50,3 ц/га. Із збільшенням дози мінеральних добрив при-ріст в урожаї повітряно сухих коренів ста-новив 4,92 ц/га і зеленої маси – 89,2 ц/га. На другому році вегетації впливала післядія мінеральних добрив на значне збільшення урожаю коренів і зеленої маси завдяки кра-щому розвитку рослин у перший рік ве-гетації. На третьому році вегетації відчутної різниці в продуктивності оману високого не виявлено. Урожай повітряно сухих коренів

на всіх варіантах становив 16,40–17,25 ц/га і незначне збільшення урожаю зеленої маси на 27,8–47,7 ц/га.

Вплив густоти насаджень та способу сіви на продуктивність оману високого. Густота насаджень значною мірою впливає на ріст і розвиток рослин протягом вегетації і в кінцевому підсумку – на продуктивність оману високого.

У перший рік вегетації висота рослин, кількість листків і площа листової поверхні за густоти рослин 110 тис./га були на рівні з густотою рослин 60 тис./га і поступово знижувалися за більшої густоти – 130 тис./га (табл. 3).

На другому році вегетації в період цві-тіння висота рослин була вищою за густоти 110–130 тис./га на 34,8–35,2 см порівняно з густотою насаджень 60 тис./га. Кількість квітконосів була більшою на варіантах із меншою густотою, а також вищий процент суцвіть, які достигли.

Густота насаджень рослин значно впли-вала на продуктивність оману. Так, за гус-тоти 60 тисяч рослин на гектар врожай повітряно-сухих коренів у середньому за 2017–2021 рр. становив 18,1 тис./га (табл. 4). Результати багаторічних дослі-джень щодо вивчення впливу густоти насаджень рослин на врожай коренів дали

Таблиця 2
Врожай оману високого залежно від застосування мінеральних добрив, ц/га
(середнє за 2015–2017 рр.)

Варіанти досліджу	Корені		Зелена маса у фазу		Насіння
	сірі	повітряно сухі	бутонізації	цвітіння	
Без добрив	12,50	6,10	96,2	238,6	1,65
$N_{30}P_{30}K_{30}$	10,23	9,53	139,6	308,7	3,07
$N_{60}P_{60}K_{60}$	24,00	12,5	186,1	429,2	3,77
$НІР_{0,5}$ ц/га	–	1,15	2,18	–	0,49
P, %		2,99	4,01	–	3,57

Таблиця 3
Висота рослин та площа листків за різної густоти насаджень у перший рік вегетації
(середнє за 2020–2022 рр.)

Густота насаджень рос-лин, тис./га	Висота рослин, см	Кількість листків, шт.	Площа листків см ²
60	17,1	4,1	332,1
90	18,3	5,0	342,3
110	21,9	4,5	336,2
130	19,3	4,3	330,1

Таблиця 4

Ріст і розвиток рослин оману високого за різної густоти насаджень рослин на другому році вегетації (середнє за 2020–2022 рр.)

Густота насаджень, Тис./га	Висота, см	Кількість, шт.				Достиглих суцвіть, %	Насіння з однієї рослини, г
		квітко-носів	суцвіть	достиглих суцвіть	листіків		
60	183,0	10,1	19,6	5,4	16,9	28,8	3,48
90	189,4	9,4	19,4	5,2	16,2	28,1	3,24
110	218,2	8,9	17,1	4,2	16,0	25,2	3,05
130	217,9	8,7	16,2	4,0	16,4	20,0	2,50

можливість визначити оптимальну густоту насаджень оману високого.

За густоти насаджень 110 тисяч на одному гектарі найбільший врожай повітряно-сухих коренів становив 23,5 ц/га, що на 5,4 ц/га вище за насадження з густотою рослин 60 тис. на гектар. Із збільшенням густоти рослин до 130 тис. урожай повітряно-сухих коренів у середньому за 2017–2021 роки зменшився на 2,5 ц/га. Врожай зеленої маси в цьому польовому досліді невисокий у зв'язку з тим, що ми проводили тільки один укіс у фазі бутонізації. Найбільш високий врожай зеленої маси відмічене за густоти рослин 90–130 тисяч на гектарі. Приріст урожаю зеленої маси досягав 27–63 ц/га порівняно з варіантом, де густота насаджень була 60 тисяч на гектар (табл. 5).

За роками досліджень відмічалася значна різниця урожаю насіння оману високого, який становив від 1,0 ц/га у 2020 році до 6,2 ц/га у 2018 році за густоти стояння 60 тисяч рослин на гектар. Це пов'язано з нерівномірним досяганням насіння, висипанням його за різних погодних умов. Із збільшенням густоти рослин до 90 тис./га

приріст урожаю насіння становив 1,4 ц/га, до 110 тис./га – 2,2 ц/га. Із збільшенням густоти стояння рослин до 130 тис./га врожай насіння був дещо нижчим (табл. 6).

У перший рік вегетації (2021 р.) урожай коренів оману високого був низький, але зі збільшенням густоти із 60 тис./га рослин до 110 тис./га врожай повітряно-сухих коренів зростав на 1,3 ц/га. Врожайність коренів на другому році вегетації зростає, поступове її збільшення відмічалось з підвищенням густоти рослин з 20,3 до 24,3 ц/га повітряно сухих коренів. Найвищий врожай повітряно-сухих коренів ми отримали на третьому-четвертому році вегетації. Так, за густоти рослин 60 тис./га врожай повітряно-сухих коренів становив 26,2 ц/га на третьому році вегетації, 28,0 ц/га – на четвертому році вегетації, а зменшення врожаю коренів спостерігалось на п'ятому році вегетації.

У 2022 році врожай повітряно-сухих коренів за густоти 60 тис./га становив на першому році вегетації 5,4 ц/га, на другому – 16,4, на третьому – 17,4, на четвертому – 18,1 ц/га. На п'ятому році вегетації спостерігалось зменшення врожаю коренів.

Таблиця 5

Врожай повітряно сухих коренів залежно від густоти насаджень, ц/га

Густота насадження рослин тис./га	Роки досліджень					Середнє	Приріст до контролю
	2017	2018	2019	2020	2021		
60	17,0	16,9	16,2	20,3	19,2	18,1	–
90	18,2	18,6	19,4	22,5	20,7	19,1	2,0
110	21,6	22,2	20,9	26,6	24,2	23,1	5,2
130	18,6	20,0	19,6	24,3	21,7	20,8	2,9
НІР _{0,5} ц/га	0,86	0,86	1,57	1,38	2,07	–	–
Р, %	1,32	1,27	2,38	1,71	2,79	–	–

Таблиця 6

Вплив густоти насаджень на врожай насіння, ц/га

Густота стояння, тис./га	Роки досліджень					Середнє	Приріст до контролю
	2017	2018	2019	2020	2021		
60	3,9	6,2	2,4	1,0	4,9	3,7	–
90	4,8	6,4	4,6	5,4	5,3	5,3	1,6
110	5,3	7,5	4,9	4,9	6,8	5,9	2,2
130	5,1	7,6	4,2	5,6	5,9	5,7	2,0
НІР _{0,5} ц/га	0,60	0,69	0,87	0,89	0,76	0,76	–
Р, %	3,60	2,89	4,27	4,05	3,81	4,52	–

Найбільш високий врожай повітряно-сухих коренів отримали за густоти рослин 110 тис./га. Потрібно відмітити, що в середньому за 2020–2022 роки врожай повітряно-сухих коренів у перший рік вегетації невисокий. Так, за густоти рослин 60 тис./га він становив 7,6 ц/га. Із збільшенням густоти врожай коренів був дещо вищим. Найбільш високий врожай повітряно-сухих коренів отримали на третьому-четвертому році вегетації за густоти рослин 110 тис./га.

Врожай зеленої маси в перший рік вегетації за густоти рослин 60 тис./га становив усього 67 ц/га у 2021 році та 56 ц/га у 2022 році, у середньому за три роки досліджень – 61 ц/га. Із збільшенням густоти рослин урожай зеленої маси збільшувався. Найбільш високий урожай зеленої маси оману високого в середньому за три роки отримали на другому-третьому році вегетації – у середньому 341–428 ц/га за густоти 60 тис./га і 381–433 ц/га за густоти 110 тис./га. На четвертий рік вегетації врожай зеленої маси зменшувався. У перший рік вегетації врожай насіння з достиглих рослин становив усього 0,26 ц/га у 2021 році та 0,16 ц/га у 2022 році. Таким чином, наші дослідження показали, що

оптимальною густотою для оману високого є 90–110 тис./га за використання його на другий-третій рік вегетації.

Зі збільшенням густоти рослин урожай насіння підвищувався на незначну величину. На другому і третьому році вегетації врожай насіння в середньому за три роки одержано найбільш високий: за густоти рослин 60 тис./га він становив 2,6–3,1 ц/га (табл. 7), за густоти 90 тис./га – 2,9–4,1 ц/га, за густоти 110 тис./га – 3,6–4,3 ц/га, і незначне збільшення врожаю насіння спостерігалось зі збільшенням густоти рослин до 130 тис./га.

Таким чином, оптимальною густотою рослин є густота 110 тис./га, за якої одержана максимальна продуктивність коренів, зеленої маси й насіння на другому-третьому році вегетації. Оман є високою рослиною, яка реагує не тільки на густоту рослин у рядках, але й на ширину міжрядь. Ріст і розвиток рослин залежно від ширини міжрядь проходив із різною інтенсивністю. Висота рослин у фазі бутонізації (другий рік вегетації) за ширини міжрядь 45 см становила 102,1 см, за ширини 60 см – 112,3, а кількість листків збільшувалася від 11,9 до 15,0 шт. відповідно на одній рослині. У фазі

Таблиця 7

Урожай насіння оману високого залежно від густоти рослин і року вегетації, ц/га (2020–2022 рр.)

Густота стояння, тис./га	Рік вегетації			
	перший	другий	третій	четвертий
60	0,21	2,6	3,1	2,4
90	0,26	2,9	4,1	3,3
110	0,30	3,6	4,3	3,7
130	0,31	3,7	4,5	3,7
НІР _{0,5} ц/га	0,10	0,50	0,43	0,33
Р, %	3,98	2,65	3,63	3,53

плодоношення великої різниці у висоті стебла й кількості листків не виявлено. Врожай повітряно сухих коренів на другому році вегетації у середньому за три роки становив 24,7 ц/га за ширини міжрядь 45 см, а зі збільшенням ширини міжрядь до 60 см спостерігалось зменшення врожаю на 4,2 ц/га.

Збільшення врожаю зеленої маси на варіанті з шириною міжрядь 45 см у середньому за 2018–2020 рр. становило 46 ц/га порівняно із шириною міжрядь 60 см. Аналогічна закономірність спостерігалась і на врожаї насіння (4,4 ц/га на варіанті із шириною міжрядь 45 см і 3,7 ц/га – на варіанті 60 см). Таким чином, для вирощування оману високого найкращою шириною міжрядь, за якої створюється оптимальна площа живлення для рослин, є 45 см.

Висновки

Внесення мінеральних добрив ($N_{30}P_{30}K_{30}$ і $N_{60}P_{60}K_{60}$) сприяло кращому росту й розвитку оману високого вже з першого року вегетації: підвищувалися висота рослин, кількість листків, площа листової поверхні та маса окремих органів.

Висота рослин наприкінці першого року вегетації зростає з 23,0 см (без добрив) до 26,0 см із внесенням $N_{60}P_{60}K_{60}$. Найвища висота (34,8 см) спостерігалась в разі посадки бруньками з коренями. Площа

листка збільшилася з 16,4 см² (без добрив) до 24,3 см² (за внесення $N_{60}P_{60}K_{60}$).

Маса листків з однієї рослини зростає з 6,3 до 11,2 г, маса стебла – з 0,9 до 1,7 г, а маса кореня – з 16,4 до 19,1 г. Товщина кореня також збільшувалась на 0,15–0,25 см.

У середньому за 2015–2017 рр. внесення $N_{30}P_{30}K_{30}$ збільшувало врожай повітряно-сухих коренів на 3,37 ц/га, зеленої маси – на 70,1 ц/га і насіння – на 1,42 ц/га. Подвійна доза добрив ($N_{60}P_{60}K_{60}$) не завжди забезпечувала суттєво вищі прибавки врожаю.

На другому році вегетації відзначено позитивну післядію добрив: урожай сирих коренів зростає до 29,5 ц/га ($N_{60}P_{60}K_{60}$), тоді як на неудобреному варіанті – 15,3 ц/га.

Максимальні показники продуктивності досягались у разі внесення $N_{30}P_{30}K_{30}$, тоді як збільшення норми добрив до $N_{60}P_{60}K_{60}$ не завжди давало економічно доцільного приросту врожаю.

Отже, мінеральні добрива мають значний вплив на продуктивність оману високого, особливо в перші два роки вегетації. Вони покращують морфометричні показники рослин, сприяють наростанню біомаси та підвищенню врожайності. Оптимальною дозою для вирощування оману високого є внесення добрив у нормі $N_{30}P_{30}K_{30}$, яка забезпечує істотний приріст урожаю за помірних витрат.

Список використаної літератури

- Біленко В.Г. Технологія вирощування лікарських рослин і використання їх у медичній та ветеринарній практиці : навчальний посібник. Київ : Арістей, 2007. 656 с.
- Вожегова Р.А., Лиховид П.В., Біляєва І.М. Сучасний стан, перспективи та напрями розвитку виробництва лікарських рослин в Україні. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки. Херсонський державний аграрно-економічний університет*. Херсон : Видавничий дім «Гельветика», 2021. № 118. С. 57–67. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.118.7>.
- Дудченко Л.Г., Козяков А.С., Кривенко В.В. Пряно-ароматичні та пряно-смакові речовини : підручник. Київ : Наукова думка, 1989. 304 с.
- Єщенко В.О., Копитко П.Г., Костогриз П.В., Опришко В.П. Основи наукових досліджень в агрономії. Вінниця, 2014. 332 с.
- Жарінов В.І., Остапенко А.І. Вирощування лікарських, ефіроолійних, пряносмакових рослин. Київ : Вища шк., 1994. 231 с.
- Климчук О.В. Лікарські рослини. Технологія вирощування : навчальний посібник. Вінниця, 2012. 187 с.
- Котуков Г.К. Культивовані і дикорослі лікарські рослини : довідник. Київ : Наук. думка, 1974.
- Лихочвор В.В., Борисюк В.С., Дубковецький С.В., Онищук Д.М. Лікарські рослини. Значення, біологічні та ботанічні особливості, технологія вирощування, заготівля. Львів : Укр. Технології, 2003. 272 с.
- Мірзоева Т.В. Аналіз сучасного стану виробництва лікарських рослин в Україні. *Приазовський економічний вісник*. 2018. № 6 (11). С. 62–67. [Електронний ресурс] URL: http://rev.kpu.zp.ua/journals/2018/6_11_uk/14.pdf (дата звернення 10.04.2025).
- Рахметов Д.Б., Стадничук Н.О., Корабляова О.А. та ін. Нові кормові, пряносмакові та овочеві інтродуценти в Лісостепу і Поліссі України. Київ : Фітосоціоцентр, 2004. 162 с.

Рябчун В.К., Кузьмишина Н.В., Богуславський Р.А., Безугла О.М., Музафарова В.М., Бондаренко В.М., Докукіна К.І. Інтродукція рослин як пріоритетний напрям наукової і практичної діяльності Національного центру генетичних ресурсів рослин України. *Генетичні ресурси рослин*. 2019. № 24. С. 11–26. <https://doi.org/10.36814/pgr.2019.24.01>.

Шевченко Т., Глущенко А. Інтродукція лікарських рослин цукрознижуючої дії та природних цукрозамінників. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2016. № 73. С. 449–449.

Islamov A.Kh., Zaripova R.Sh., Murodova T.M., Gaibullaeva O.O. Propagation of *Inula helenium* L. Plant and determination of elements content and biological characteristics. *Research Journal of Analysis and Inventions*. 2024. Vol. 5 (4). P. 15–23.

Jevđović D.R., Filipović M.V., Radanović O.D., Maletić M.R. Variranje prinosa korena omana u odnosu na genotipu. *Naučno – stručno savjetovanje agronoma Republike Srpske sa međunarodnim učešćem 'Proizvodnja hrane u uslovima otvorenog tržišta'*. Teslić. Republika Srpska. 2004. 15–18 mart. 61 p.

Kovačević N. Fiziološki aktivni sastojci biljaka familije Asteraceae. *Arhiv za farmaciju*. 1995. Vol. 45 (5). P. 183–198.

Stepanović B., Radanović D., Kisgeci J. Kultivacija lekovitog i aromatičnog bilja u Srbiji. *XXV Savetovanja o lekovitim i aromatičnim biljkama*. Bajina Bašta. 2002. 9–14 jun. P. 62–63. [Електронний ресурс] URL: <http://journalagroeco.org.ua/article/view/248267> (дата звернення: 20.04.2025).

References

Bilenko, V.H. (2007). Tekhnolohiya vyroshchuvannya likarskykh roslyn i vykorystannya yikh u medychnyi ta veterynarniy praktysy [Techniques for the treatment of likarskykh roslyn and their use in medical and veterinary practice]. Navchalnyy posibnyk [Study guide]. Kyiv: Aristey [in Ukrainian].

Vozhehova, R.A., Lykhovyd, P.V., & Bilyayeva, I.M. (2021). Suchasnyy stan, perspektyvy ta napryamy rozvytku vyrobnytstva likarskykh roslyn v Ukraini [Current state, prospects and directions of development of medicinal plants production in Ukraine]. *Tavriyskyy naukovyy visnyk. Seriya: Silskohospodarski nauky. Khersonskyy derzhavnyy aharno-ekonomichnyy universytet*. Kherson: Vydavnychyy dim “Helvetyka” [Tavrian Scientific Bulletin. Series: Agricultural sciences. Kherson State Agrarian and Economic University. Kherson: Publishing house “Helvetica”], 118, 57–67. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.118.7> [in Ukrainian].

Dudchenko, L.H., Kozyakov, A.S., & Kryvenko, V.V. (2012). Pryano-aromatychni ta pryano-smakovi rehovyny [Spicy aromatic and flavoring substances]. Pidruchnyk [Textbook]. Kyiv : Naukova dumka [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 [in Ukrainian].

Zharinov, V.I., & Ostapenko, A.I. (1994). Vyroshchuvannya likarskykh, efirooliynykh, pryanosmakovykh roslyn [Cultivation of medicinal, essential oil and spice plants]. Kyiv : Vyshcha shkola [in Ukrainian].

Klymchuk, O.V. (2012). Likarski roslyny. Tekhnolohiya vyroshchuvannya [Medicinal plants. Growing technology]. Navchalnyy posibnyk [Study guide]. Vinnytsya [in Ukrainian].

Kotukov, H.K. (1974). Kulytovani i dykorusli likarski roslyny [Cultivated and wild medicinal plants]. Dovidnyk [Reference book]. Kyiv : Nauk. dumka [in Ukrainian].

Lykhochvor, V.V., Borysyuk, V.S., Dubkovetsky, S.V., & Onyshchuk, D.M. (2003). Likarski roslyny. Znachennya, biolohichni ta botanichni osoblyvosti, tekhnolohiya vyroshchuvannya, zahativlya [Medicinal plants. Significance, biological and botanical features, cultivation technology, harvesting]. Lviv : Ukr. tekhnolohiyi [in Ukrainian].

Mirzoyeva, T.V. (2018). Analiz suchasnoho stanu vyrobnytstva likarskykh roslyn v Ukraini [Analysis of the current state of medicinal plant production in Ukraine]. *Pryazovskyy ekonomichnyy visnyk [Priazovsky Economic Bulletin]*, 6 (11), 62–67. [Electronic resource] URL: http://pev.kpu.zp.ua/journals/2018/6_11_uk/14.pdf (access date 10.04.2025) [in Ukrainian].

Rakhmetov, D.B., Stadnychuk, N.O., & Korablova, O.A. (2004). Novi kormovi, pryanosmakovi ta ovochevi introdutsenty v Lisostepu i Polissi Ukrainy [New forage, spice and vegetable introductions in the Forest-Steppe and Polissya regions of Ukraine]. Kyiv : Fitosotsiotsentr [in Ukrainian].

Ryabchun, V.K., Kuzmyshyna, N.V., Bohuslavskyy, R.L., Bezuhla, O.M., Muzafarova, V.M., Bondarenko, V.M., & Dokukina, K.I. (2019). Introduktsiya roslyn yak priorytetnyy napryam naukovoyi i praktychnoyi diyalnosti Natsionalnoho tsentru henetychnykh resursiv roslyn Ukrainy

[Plant introduction as a priority area of scientific and practical activities of the National Center for Plant Genetic Resources of Ukraine]. *Henetychni resursy roslyn [Plant genetic resources]*, 24, 11–26. <https://doi.org/10.36814/pgr.2019.24.01> [in Ukrainian].

Shevchenko, T., & Hlushchenko, L. (2016). Introduktsiya likarskykh roslyn tsukroznyzhuyuchoyi diyi ta pryrodnykh tsukrozaminnykiv [Introduction of medicinal plants with sugar-lowering effect and natural sugar substitutes]. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Seriya biolohichna [Bulletin of Lviv University. Biological series]*, 73, 449–449 [in Ukrainian].

Islamov, A.Kh., Zaripova, R.Sh., Murodova, T.M., & Gaibullaeva, O.O. (2024). Propagation of *Inula helenium* L. Plant and determination of elements content and biological characteristics. *Research Jet Journal of Analysis and Inventions*, 5 (4), 15–23 [in English].

Jevđović, D.R., Filipović, M.V., Radanović, O.D., & Maletić, M.R. (2004). Variranje prinosa korena omana u odnosu na genotipu [Variation in the yield of comfrey root in relation to genotype]. Naučno – stručno savjetovanje agronoma Republike Srpske sa međunarodnim učešćem 'Proizvodnja hrane u uslovima otvorenog tržišta' [Scientific and professional consultation of agronomists of the Republic of Srpska with international participation 'Food production in open market conditions']. Teslić. Republika Srpska. 15–18 mart [in Serbian].

Kovačević, N. (1995). Fiziološki aktivni sastojci biljaka familije Asteraceae [Physiologically active constituents of plants of the Asteraceae family]. *Arhiv za farmaciju [Archives for Pharmacy]*, 45 (5), 183–198 [in Serbian].

Stepanović, B., Radanović, D., & Kisgeci, J. (2002). Kultivacija lekovitog i aromatičnog bilja u Srbiji [Cultivation of medicinal and aromatic plants in Serbia]. XXV Savetovanja o lekovitim i aromatičnim biljkama [Conference on Medicinal and Aromatic Plants]. *Bajina Bašta*, 9–14, 62–63 [Electronic resource] URL: <http://journalagroeco.org.ua/article/view/248267> (access date 20.04.2025). [in Serbian].

Отримано: 21.04.2025

Прийнято: 15.05.2025



Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 12
Український журнал природничих наук
№ 12

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

УДК 633.16:582.112+591.151

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.18>

АНАЛІЗ ВІРУЛЕНТНОСТІ ЗБУДНИКА *BLUMERIA GRAMINIS F. SP. HORDEI* ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ГЕНІВ СТІЙКОСТІ ЯЧМЕНЮ

Ю. М. Кононенко¹

У статті проаналізовано динаміку частот генів вірулентності збудника борошнистої роси ячменю й ефективність генів стійкості. Показано, що в українських агроєкосистемах була високо варіабельна популяція патогена, подібна до популяцій суміжних країн. Проведено порівняльний аналіз із сучасними популяціями збудника в Латвії, Литві, Польщі, Словаччині та Чехії, наведено аналіз популяцій з Австралії, Казахстану та Китаю. З'ясовано, що найефективнішим залишається ген неспецифічної резистентності *mlo*, до якого не було виявлено вірулентних ізолятів. Його ефективність дуже стабільна навіть після 43 років його присутності в комерційних сортах, незважаючи на те, що ці сорти переважали у Європі принаймні протягом останніх трьох десятиліть. Частка новозареєстрованих сортів із цим геном зростає з 63% у 2006–2010 рр. до 83% протягом 2016–2020 рр. Підтверджено стійкість генів *Mla3*, *Mlk*, *Sl-1*, *Mla1* та повідомляється про часткове подолання стійкості для комбінації генів *MILa+Mla7*. Ефективність гена *Mlr* у Європі втрачено та виявлено підвищення вірулентностей до нового гена стійкості *MLVe*. Встановлено новий ген стійкості, який названо *mlmr*. Порівняння генетичної структури популяцій *Vg1* у Казахстані з популяціями Європи, Африки, Австралії та Південно-Східної Азії виявило відмінності. На основі об'єднаних результатів аналізу вірулентності та резистентності повідомляється, що ген вірулентності *Vp1* стає головним фактором, що сприяє підвищенню складності вірулентності та різноманітності патотипів у Центральній Європі. Встановлено загальну тенденцію зростання генетичної різноманітності патогенів, що обумовлює поступову втрату ефективності більшості моногенних генів стійкості. Стабільне вирощування ячменю в умовах постійної еволюції патогена потребує стратегічного використання стійких генотипів, упровадження нових джерел стійкості та безперервного моніторингу популяцій збудника борошнистої роси ячменю як в Україні, так і в Європі.

Ключові слова: ячмінь, борошниста роса, гени стійкості, гени вірулентності.

¹ кандидат біологічних наук,
асистент кафедри захисту, генетики та селекції рослин
(Одеський державний аграрний університет, м. Одеса)
e-mail: kononenkoyuliya123@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5724-9101

ANALYSIS OF THE VIRULENCE OF THE PATHOGEN *BLUMERIA GRAMINIS F. SP. HORDEI* AND THE EFFECTIVENESS OF BARLEY RESISTANCE GENES

Y. M. Kononenko

The article analyzes the frequency dynamics of virulence genes of the barley powdery mildew pathogen and the effectiveness of resistance genes. It is shown that in Ukrainian agroecosystems there was a highly variable pathogen population, similar to the populations of neighboring countries. A comparative analysis was conducted with modern populations of the pathogen in Latvia, Lithuania, Poland, Slovakia and the Czech Republic, and an analysis of populations from Australia, Kazakhstan and China was provided. It was found that the most effective remains the non-specific resistance gene *mlo*, for which no virulent isolates were detected. Its effectiveness is very stable even after 43 years of its presence in commercial varieties, despite the fact that these varieties have prevailed in Europe for at least the last three decades. The share of newly registered varieties with this gene increased from 63% in 2006–2010 to 83% during 2016–2020. The resistance of the *Mla3*, *MLk*, *Sl-1*, *Mla1* genes was confirmed and partial overcoming of resistance was reported for the *MLa+Mla7* gene combination. The effectiveness of the *Mlp* gene in Europe was lost and an increase in virulence was detected due to the new resistance gene *MLVe*.

A new resistance gene was identified and named *mlmr*. Comparison of the genetic structure of *Bgh* populations in Kazakhstan with populations in Europe, Africa, Australia and Southeast Asia revealed differences. Based on the combined results of the virulence and resistance analysis, it is reported that the virulence gene *Vp1* is becoming the main factor contributing to the increase in virulence complexity and pathotype diversity in Central Europe. A general trend of increasing genetic diversity of pathogens has been established, which causes a gradual loss of the effectiveness of most monogenic resistance genes. Stable barley cultivation in conditions of constant pathogen evolution requires strategic use of resistant genotypes, introduction of new sources of resistance, and continuous monitoring of barley powdery mildew pathogen populations both in Ukraine and in Europe.

Key words: barley, powdery mildew, resistance genes, virulence genes.

Вступ

Головним завданням у сільському господарстві є збільшення виробництва зерна сільськогосподарських культур, але однією з причин зниження продуктивності зернових культур є ураження хворобами. Господарі та патогени адаптували свою реакцію один на одного через генетичні зміни, які виникли під час їх спільної еволюції. У розвинутих країнах довговічність сортів часто коротка; нові сорти часто мають нові гени зі специфічною стійкістю до патогенів. Останні повинні адаптуватися до генів резистентності, щоб зберегти патогенність.

Борошниста роса ячменю озимого та ярого, збудником якої є гриб *Blumeria graminis f. sp. hordei* (*Bgh*), – листовна хвороба, що має всесвітнє значення й завдає значної шкоди в Україні. Частота її поширення завжди була високою, однак останніми роками, завдяки потеплінню та зміні клімату, значно зросла. Активізації патогена також сприяють насиченість полів сівозміни ячменем, вирощуванням озимого та ярого ячменю на сусідніх полях і вирощування нестійких до хвороби та імунологічно однорідних сортів.

У Центральній і Північно-Західній Європі ці загальні характеристики збудника поси-

люються тривалим і масовим використанням різноманітних стійких сортів, висока концентрація ячменю утворює майже ідеальний «зелений міст», оптимізований м'якими кліматичними умовами, за яких можливе спільне вирощування ярого й озимого ячменю. У холодний період *Bgh* розмножується на своєму зимовому хазяїні. Наступного літа вегетація ярих і озимих типів пов'язана з великою масою самостійних рослин, які несуть ті самі гени специфічної стійкості, що і їх батьківські сорти, але часто відрізняються між цими двома формами. Усі ці фактори сприяють спрямованому відбору вірулентних патотипів на сортах із різноманітними генами специфічної стійкості та призводять до високої складності вірулентності та різноманітності патогенів. Отримати достатню стійкість проти борошнистої роси шляхом виведення сортів зі специфічною стійкістю та їх поєднанням важко (Dreiseitl, 2018).

Хвороба проявляється у вигляді білого нальоту на різних частинах рослин упродовж усього вегетаційного періоду, але найінтенсивніше в період кущіння – виходу в трубку. Первинним інокулюмом є конідії, або сумкоспори, які повітрям здатні переміщатися на великі відстані. Для збудника борошнистої роси підраховано, що на 1 га

ячменю виникає 10^9 уражень, кожне з них продукує 10^4 конідій кожен день. Є повідомлення, що спори збудника борошнистої роси з Європи легко досягають Великої Британії. Тому контроль за генетичною популяцією патогена дуже важливий.

Слід зазначити, що сильніше хвороба розвивається на загущених, а також пізніх посівах ячменю. Пригнічується фотосинтез рослин, оскільки поверхня листя вкрита нальотом спороношення гриба, що послаблює рослину та впливає на ріст. Уражуються всі надземні частини рослини; листя жовтіє і засихає, що призводить до втрати урожаю до 30% і погіршує якість зерна. Раннє ураження збудником може призвести до втрати врожаю сприйнятливих сортів ячменю до 25%, а пізніше – до 10 %. Також повідомлялося, що посіви ячменю, уражені збудником борошнистої роси, більше вилягають і мають зниження врожайності порівняно з посівами, що мають стійкість до патогена (Kithsiri, 2020; Crop Protection, 2022; Marzani et al., 2023).

Найбільш ефективним способом захисту сільськогосподарських культур є використання генетичної стійкості. Вирощування стійких сортів є екологічно чистим і недорогим способом захисту рослин. Численні алелі специфічної стійкості до хвороб зустрічаються в зернових та інших культурах, і знання про їх присутність в окремих сортах широко використовуються в дослідженнях і практиці. Однак збудник *Bgh* є надзвичайно адаптивним – швидка зміна генетичної структури патогена часто перекреслює трудомістку роботу, затрачену на виведення сорту, що значною мірою перешкоджає розвитку селекції на стійкість до хвороби. Надзвичайна адаптивність і мінливість збудника потребує постійного контролю за його вірулентністю, вивчення його спеціалізації до сортів і форм ячменю, що дасть змогу виділяти стійкі генотипи.

Для *Bgh*, що поширюється за допомогою повітряних течій, важливою є інформація про просторове розміщення генів вірулентності в регіоні, країні й навіть на континенті. Аналіз генотипного складу повинен проводитися постійно в кожній країні з метою визначення потенціалу вірулентності патогена й недопущення втрати стійкості сортами ячменю. Успішна селекція на стійкість неможлива без знання генетичної вірулентності популяції збудника хвороби та закономірностей успадкування стійкості у рослин.

Протягом останніх 15 років виявлення й аналіз вірулентності *Bgh* в Україні не проводилися, тому немає інформації про наявні компоненти вірулентності й основні патотипи в областях. Тож буде цікавим аналіз генетичної структури популяцій сусідніх європейських, адже наші популяції *Bgh* дуже схожі.

Матеріал і методи

Ячмінь є важливою культурою, яка щорічно вирощується приблизно на 55 мл га всьому світі. У Європі ячмінь відіграє більш важливу роль у вирощуванні сільськогосподарських культур, ніж деінде світі. У 2020 році вирощувалося 46% світової площі ячменю, що становить понад 60% світового виробництва. Відносно прохолодні і вологі клімат Європи сприяє поширенню борошнистої роси, що робить її найпоширенішою хворобою ячменю (Dreiseitl, 2022; 2023a).

По всій Європі проводяться національні «огляди вірулентності». Широко проводяться дослідження генетичної структури *Bgh* в Чехії, Польщі, Литві, Латвії. Також досліджується патоген і поза межами європейських країн, наприклад в Австралії, Казахстані, Туреччині, Китаї та ін.

Головною метою їх є контроль за змінами в частоті патотипів або окремих генів для селекції та вирощування сортів ячменю. Якщо специфічний ген стійкості долається популяцією збудника в одній області, то виникає загроза для сортів, які володіють тією ж самою стійкістю і вирощуються в сусідніх областях. Тому систематичне вивчення структури вірулентності популяцій збудника є необхідною частиною ефективного застосування імунологічного методу захисту.

Зміна вірулентності патогена, яка відбувається різними шляхами, може зробити резистентні сорти ячменю сприйнятливими до ураження збудником борошнистої роси. Такі фактори, як мутація, розмір популяції та випадковий генетичний дрейф, потік генів і генотипів, системи розмноження та спарювання, відбір, що накладається основною резистентністю генів, і кількісна резистентність можуть впливати на генетичну різноманітність патогенних грибів.

Розуміння факторів, що впливають на еволюцію патогенів, моніторинг біології патогенів і генетичної різноманітності допоможе розробити ефективні стратегії контролю. Адже використання стійких сортів мінімізує вплив борошнистої роси та є найбільш економічним способом боротьби із хворобою.

Дослідження генетичної популяції збудника в Україні були виконані в лабораторії імунітету Інституту захисту рослин НААН у 2006–2009 роках. Для визначення частот генів вірулентності збудника використовували європейський набір сортів-диференціаторів і набір ізогенних ліній Pallas з послідовним розміщенням генів, що були виведені Kolster P. для вивчення ефектів генів в ячмені, що показують специфічну стійкість до борошнистої роси. Експериментальна робота проводилася в зоні Центрального та Північного Лісостепу України – на дослідних полях Миронівського інституту пшениці ім. В. М. Ремесла НААН, Інституту фізіології рослин і генетики НААН і в лабораторних умовах Інституту захисту рослин НААН.

Результати й їх обговорення

У селекції рослин для стійкості збудників хвороб часто використовують головні гени. Вони здебільшого надають резистентність, яку можна подолати відповідною вірулентністю патогена, специфічною для резистентності, наданої цим геном. Було описано понад 150 генів стійкості, однак у європейській селекції і в нашій країні використовувалися лише деякі. У сортах 60–70-х рр. одержали поширення гени *Mla*, *Mla2*, *Mla3*, *Mla4*, *Mla5*, *Mla6*, *Mla7*, *Mla8*, *Mla9*, *Mla10*, *Mla11*, *Mla12*, *Mla13*, *Mlg*, *Mlk*, *Mlat*, *Mlag*, *Mls*, *Mlp*, *Mlh*, *mlo*, але ефективно контролювали стійкість до збудника лише 8–10 із них (Лісовий і Кононенко, 2006; 2007). Встановлення генів специфічної стійкості проти борошнистої роси у сортів ячменю проводилося переважно в Північно-Західній (Данія, Франція, Нідерланди, Швеція, Велика Британія) і Центральній Європі (Австрія, Чехія, Німеччина та Польща), і вже в 1991 році гени стійкості 699 європейських сортів були зібрані в каталог (Brown & Jørgensen, 1990). Більшість із них уже втратили своє первісне значення. Тому однією з головних задач селекції та імунології на сучасному етапі є збільшення генетичної різноманітності генів стійкості. Без достатньої кількості генів стабільної стійкості селекція на стійкість буде або дуже обмежена, або приречена на невдачу.

У західній частині України, як зазначала Косилович Г. О., впродовж досліджень (1993–2002 рр.) була високою частота (понад 50%) таких генів вірулентності, як *Vra*, *Vh*, *Vnn*, *Va22*, *Vg+V(cp)*, *Va1*, *Va9*, *Va7*, *Vk*, *Va7+Vk*. Вірулентність патогена проти генів стійкості *Mla6*, *Mla9*, *Mlnn*, *Mla9+Mlk*

була змінною. Їх частота коливалася в межах 41–52% для *Va6* вірулентності; 32–72% – для *Va9*; 35–64% – для *Vnn* і 0–75% – *Va9+Vk*. Високі частоти *Vra*, *Vh*, *Vnn*, *Va22*, *Va7*, *Vk* пояснювалися перенесенням повітряними течіями спор патогена із сусідніх країн. Генетична структура західноукраїнської популяції збудника борошнистої роси була подібною до популяцій гриба прилеглих країн – Латвії, Польщі, Чехії, Словацької республіки. Низькі частоти генів вірулентності спостерігалися щодо алелів *Mla3*, *Mla12*, *Mla13*, *Mka23*, *Mla1+Mlat* та *Ml(la)*. Для гена *mlo* не було знайдено жодного вірулентного ізоляту впродовж усіх років досліджень (Лісовий і Кононенко, 2006).

Аналіз вірулентності популяції *Bgh*, проведений нами у 2006–2009 рр. у Центральному Лісостепу України, показав високу частоту – понад 50% для всіх генів вірулентності. Найвищу частоту генів вірулентності було встановлено для *Va1+Vat*, *Vg+V*, *Va6*, *Va3*; *Va8*; *Va1*; *Va7*, *Vk*; *Va7*; *Va7*, *V(lg)*; *Va9*; *Va10*, *V(du)* – 81–87%. Найменшу частоту – для *Va23*; *Vp*; *Vra*; *V(ru2)* – 29–55%. Високоефективним був ген стійкості *mlo5*, до нього не було виявлено жодної вірулентності, а його ефективність становила 100%. Високу ефективність показували гени *Mlra*; *Mla23*; *Mlp* – 64–71%.

У зоні Полісся України найвищу частоту показав ген вірулентності *Va22* – 100%, найменшу *Vn* – 55%. Усі інші гени вірулентності характеризувалися високою частотою – 65–95%. Найвища ефективність була у гена *Mln* – 45%.

Щорічно і значною мірою хвороба проявляється в Київській, Харківській, Львівській, Вінницькій, Чернігівській, Закарпатській, Одеській, Херсонській та інших областях вирощування ячменю.

Проведений нами аналіз частот генів вірулентності вказував на високу різноманітність української популяції збудника *Bgh* та подібність із популяціями із сусідніх країн. Висока частота генів вірулентності була зумовлена довготривалим вирощуванням і значними посівними площами в Україні сортів з відповідними генами стійкості, а також високою аерогенністю поширення збудника хвороби із сусідніх регіонів та країн. Тому спробуємо проаналізувати популяції *Bgh* в сусідніх країнах на цей час, оскільки в Україні дослідження зараз не є можливими.

З 1980-х років у Латвії спостерігалися високі частоти генів вірулентності *Va6*, *Va7*,

Va11, *Va12*, *Vg*, *Vk*, *Vp*. У 1996–2002 рр. частоти генів *Va6*, *Va7*, *Va9*, *Va12*, *Vk*, *Vla* залишалися високими. Натомість вірулентність до лінії *SI1* та сорту *Steffi* була дуже низькою. Ген *mlo* залишався ефективним. Значне зростання частот *Va1*, *Va3*, *Va13* відбулося з 1996 по 2002 рік – з 4–14% до 33–53%. Це було пов'язано з поширенням спор збудника *Bgh* із заходу на схід зі швидкістю ~100 км/рік. У 2003–2004 рр. частота *Va1*, *Va3*, *Va13* залишалася високою, але вже повідомлялось про її зниження. Частота для стійких сортів *Steffi*, *Goldie*, *Meltan*, *SI1* залишалася низькою. У 2009–2010 рр. зафіксовано підвищення різноманітності патотипів, особливо за генами *Va1*, *Va3*, *Va13*.

Аналіз багаторічних даних свідчить про складну динаміку змін у структурі популяції *Bgh* в Латвії. Стійкі гени, зокрема ***mlo***, залишаються ефективними протягом десятиліть, тоді як інші, як-от ***Mla1***, ***Mla3***, ***Mla13***, поступово втрачали ефективність через зростання вірулентних патотипів. Швидкість поширення нових патотипів підкреслює важливість регіонального моніторингу та використання полігенетичної стійкості в селекції ячменю (Лісовий і Кононенко, 2006; Rashall et al., 2004; Kokina & Rashal 2005; 2012).

У період 2004–2005 років у Литві було виявлено 23 гени стійкості, з яких моногени *mlo* та *1-B-53* показали найвищу стійкість. Найбільш стійкими сортами без гена *mlo* стали Примус, Асторія, Пауер, Харрінгтон і Скарлетт. У 2010 році вже було зафіксовано широкий діапазон частот генів вірулентності – від 0 до 90%. Спостерігалось збільшення вірулентності щодо *Vla*, однак вірулентності щодо лінії *SI1* та гена *mlo* не було виявлено. Широке розмаїття популяції було підтверджено наявністю великої кількості виявлених патотипів – *Va7*, *Va9*, *Va12*, *Vk*, *Vla*. Порівняно з 2000 роком у 2010 році були зафіксовані значні зміни частоти та складності патотипів генів вірулентності (Liatukas & Leistrumaitė, 2007; Kokina et al., 2014).

Ярий ячмінь був другою за величиною культурою в Словаччині з 2000 по 2010 рік. У той час ефективними були 13 генів резистентності, а саме *mlo*, *Mla1*, *Mla6*, *Mla12*, *Mla13*, *MlaRu4*, *Mlat*, *Mlg*, *Mla*, *Ml(Ab)*, *Ml(Hu4)*, *Ml(Ro)* та *Ml(St)*. Найпоширенішим геном був *mlo*, який був присутній у 25 досліджених сортів (Dreiseitl & Krizánová, 2012).

З 2009 по 2014 рік у Чехії з'явилися нові рідкісні гени вірулентності, щонайменше

4 вірулентності до стійких сортів *Laverda*, *Psaknon*, *Venezia* та *SJ048311* були новими. Проте також було виявлено 4 рідкісні ізоляти, авірулентні до стійкості *Ha*. Жодного ізоляту, авірулентного до резистентності *Ra*, *HH (a8)* і *Lo*, виявлено не було.

Сорт *Psaknon* був одним із перших сортів, у якого була виявлена стійкість до борошнистої роси (*Mlp1*) і не було жодного патотипу з відповідною вірулентністю. У 2014 році вже були виявлені 4 ізоляти, вірулентні до *Mlp1*, а також вірулентні до 7 інших резистентних, включно із сортом *Venezia*. На основі об'єднаних результатів вірулентності та резистентності було зроблено висновок, що *Vp1* стає головним фактором, що сприяє підвищенню складності вірулентності й різноманітності патотипів у Центральній Європі (Dreiseitl, 2015a; 2015b).

У 2016–2020 роках у Чехії було зареєстровано 57 сортів ячменю та виявлено 18 відомих і декілька невідомих генів стійкості. У ярого ячменю все ще переважав рецесивний ген стійкості *mlo*, який представляв неспецифічну стійкість; генів вірулентності проти нього не виявлено, і можливість їх появи не очікується. Його ефективність дуже стабільна навіть після 43 років його присутності в комерційних сортах незважаючи на те, що ці сорти переважали в Європі принаймні протягом останніх трьох десятиліть.

У період з 2000 по 2011 рік для гена *Mlr* не було виявлено жодного вірулентного ізоляту. Перші вірулентні ізоляти були виявлені в країні у 2009 році, але їх низька частота (близько 1%) була стабільною принаймні до 2017 року. Однак у 2019 році частота вірулентності цього гена зросла приблизно до 5%, а у 2021 році вже перевищила 50 %. Ця раптова зміна, мабуть, була спричинена перенесенням патогена з інших європейських країн, де сорти з *Mlr* вирощувалися в попередні роки (принаймні в Німеччині та Польщі).

Ячмінь дворядний *SU Celly* був першим сортом, зареєстрованим у Чеській Республіці, у якому виявлено *MlVe*. Першу вірулентність до гена *MlVe* виявили у 2011 році, а до 2017 року її частота в локальній популяції досягла 8,3% через міграцію спор. Незважаючи на це, *MlVe* залишався єдиним новим геном стійкості, зареєстрованим у Чехії на той час.

Стійкість ярих чеських сортів базується насамперед на тривалій неспецифічній стійкості *mlo*. Частка новозареєстрованих сортів із цим геном зросла з 62,9% у 2006–2010 рр.

до 82,8% протягом 2016–2020 рр. (Dreiseitl, 2022).

Порівняння чеської популяції збудника борошнистої роси з австралійською у 2016 році показало, що 73,2% чеських ізолятів виявилися генетично унікальними. Надзвичайна різноманітність цієї колекції сильно контрастувала з одноманітністю австралійської. Ця робота прокладає шлях для вивчення структури та динаміки популяції на основі генетичної мінливості серед різних ізолятів *Bgh*, що походять із географічно обмежених регіонів.

У 2016 та 2017 роках популяція була дуже різноманітною – 226 ізолятів були представлені 224 патотипами (простий індекс = 0,982). Це ілюструє важливість генетичної рекомбінації у формуванні цієї популяції патогенів. Відбулося поступове зниження частоти вірулентності до деяких генів стійкості, що призвело до зниження середньої складності вірулентності з 11,3 у 2015 році до 9,3 у 2017 році. Причина може бути пов'язана зі зменшенням площі сортів із особливою стійкістю, що призводить до послаблення спрямованого відбору (Dreiseitl, 2018).

Цікаві дослідження були проведені у 2019–2023 роках, коли спори патогена збирали за допомогою автомобіля, переїжджаючи через країну. Було виявлено 295 патотипів (простий індекс = 0,99), а складність вірулентності ізолятів варіювалася від 4 до 19 із середнім показником 10,4. Виявлення нових вірулентностей, збільшення частоти раніше рідкісних вірулентностей і висока різноманітність патотипів, а також висока складність вірулентності підтверджують, що використання неспецифічної тривалої стійкості має вирішальне значення для успішного виведення комерційних сортів (Dreiseitl, 2023b).

Нині в публікаціях чеські вчені повідомляють, що у 2025 році не втратив своєї ефективності лише один моногенний, негіперчутливий, неспецифічний ген стійкості *mlo*. Він переважає в центральній і західній частинах Європи (Dreiseitl, 2025).

У Польщі вивчення популяції збудника борошнистої роси ячменю ведеться з 1971 року. Найбільш поширеними в популяції були гени вірулентності *Vg*, *Va7* і *Va6* на ярих сортах ячменю і гени *Vra* і *Vh* – на озимих. За подальші роки досліджень було відмічено зростання частоти генів вірулентності *Va12*, *V(la)*, *Va13*, *Va9*. Гени *Val*, *Va3*, *Va7+Av* мали низьку частоту вірулентності.

Czembor H.J. вважав, що стійкість сортам ячменю забезпечували 3 алелі стійкості – *Mlat*, *Mla6+*, *Mla14* – поряд з іншими не ідентифікованими генами (Лісовий і Кононенко, 2006).

Подальші дослідження у 2004–2006 рр. показали, що сорти озимого ячменю мали один або декілька генів стійкості в локусах *Mlra*, *Mla6*, *Mla7*, *Mla7(Ab)*, *MlSt*, *Ml(SI-1)*, *Mlh*, *Mlk*, а також було виявлено 6 невідомих генів. У ярих сортів було виявлено 12 різних генів стійкості: *Mla1*, *Mla3*, *Mla7*, *Mla9*, *Mla12*, *Mla13*, *Mlg*, *MLa*, *Ml(SI-1)*, *Ml(St)*, *Mlk*, *mlo* та 5 невідомих генів. Лише сорти з геном *mlo* та *Ml(SI-1)* мали високий рівень стійкості до борошнистої роси в Польщі (Czembor, 2008).

У 2011 році повідомлялося, що озимі сорти ячменю мали *Mla6*, *Mla14*, а у ярих сортів було встановлено наявність генів *Mla1*, *Ml 1-B-53* та *mlo*. Лише сорти з геном *mlo* та 2 сорти з неідентифікованими генами мали високий рівень стійкості до популяції *Bgh* (Czembor et al., 2012).

Проведені у 2011–2012 роках дослідження показали високу частоту вірулентності збудника борошнистої роси стосовно генів резистентності *Mla3*, *Mla7+Mlk*, *Mla7* і *Ml(Ru2)*. Низька частота вірулентності була помічена щодо сортів Monte Christo+Kwan, Monte Christo, HOR 1402, Psaknon, Laevigatum та гена *mlo*.

У 2012 р. відзначено високу вірулентність *Va6+Va14*, *Va7*, *Va13* і *Vk*. Низька частота вірулентності спостерігалася щодо сортів Nigrinudum, Psaknon, *mlo* та Laevigatum – відповідна вірулентність *Vnn*, *Vp*, *Vo* та *V(La)*.

Подібні результати, особливо з низько-частотною вірулентністю щодо стійкості до *mlo* (відповідна вірулентність *Vo*), були отримані іншими дослідниками у 2004–2005 рр. (Tratwal & Bocianowski, 2014).

У 2020 році польські вчені виявили новий ген стійкості в лінії ярого ячменю 173-1-2, відібраної з марокканського ландраса, яка показала широкий спектр стійкості до борошнистої роси. Новий ген стійкості був позначений як *mlmr* (Piechota et al., 2020).

У 2022 році було встановлено, що стійкість 32 сортів (61,5% протестованих) визначається геном *mlo5*. Також стійкість показали гени *Mla3*, *Mlk*, *Sl-1* (Czembor et al., 2023).

Австралія є одним із найбільших експортерів ячменю у світі, борошниста роса за величиною втрати врожаю ячменю посідає 2-ге місце (Murray & Brennan, 2010).

У період з 2007 по 2013 рік спостерігалися тривалі спалахи борошнистої роси ячменю. Це сталося завдяки поєднанню широкого використання сприйнятливих сортів і надмірної залежності від невеликої кількості фунгіцидів-інгібіторів деметилювання з єдиним механізмом дії, які відбирають мутації в гені C14a-деметиلاзи (Cyp51A). Серйозність захворювання зазвичай низька, хоча втрати врожаю зерна можуть коливатися від 12 до 60%, з потенційними значними втратами в деяких районах і сезонах (Ellwood et al., 2024).

Щоб вивчити цю адаптацію, 50 центральноєвропейських і 50 австралійських ізолятів *Bgh* були протестовані на 50 диференціальних сортах ячменю з різними специфічними генами стійкості. Усі центральноєвропейські ізоляти відрізнялися один від одного своїми комбінаціями вірулентності та належали до 50 різних патотипів, тоді як австралійські ізоляти охоплювали 37 патотипів. Жоден із патотипів, виявлених у Центральній Європі, не був ідентичним або подібним до будь-якого з тих, що зустрічаються в Австралії. Це можна пояснити значно більшою кількістю вірулентностей у центральноєвропейських ізолятах, які розвинулися протягом тривалого періоду контакту з низкою різновидів господаря, що містять специфічні гени стійкості. Це призвело до поступового розходження австралійської та європейської популяції *Bgh*. У Європі, на відміну від Австралії, нові специфічні гени стійкості все ще широко використовуються в селекції сортів ячменю, і дивергенція обох популяцій триватиме (Dreiseitl, 2014).

Популяція *Bgh* у 2020 році мала середній рівень вірулентності. Повідомлялося про високу ефективність генів стійкості *mlo*, *Mla1*. Часткове подолання вірулентності було встановлено для комбінації генів *MILa+Mla7*. Стійкість генів *Mla8* та *MILa* була подолана, виявлені вірулентні гени збудника (Western Australia Crop Sowing Guide, 2020).

У Казахстані у 2015–2016 рр. уперше описано характеристики структури патотипів *Bgh* та досліджено ефективність генів стійкості ячменю. Усі ізоляти були вірулентними до гена ***Mla8***. Повна авірулентність виявлена до генів *Mla9*, *Mla1+MlaAl2*, *Mla6+Mla14*, *Mla7+MlNo3*, *Mla10+MlDu2*, *Mla13+MlRu3*, *Mlo-5*. Часткова вірулентність (0,0–33,3%) встановлена щодо генів *Mla3*, *Mla22*, *Mlat*, *Mlg+MlCP*, *Mla12+MlEm²*. Висока мінливість вірулентності (10–78,6%) спостерігалася до генів: *Mlra*, *Mlk*, *MILa*, *Mlh*. На основі реакції

диференційних ліній, що несуть гени *Mla22*, *Mlra*, *Mlk*, *Mlat*, *MILa* і *Mlh*, ідентифіковано окремі патотипи збудника.

Генетична структура популяції ***Bgh*** у Казахстані істотно відрізняється від таких у Європі, Африці, Австралії та Південно-Східній Азії. Відсутність вірулентності до окремих генів стійкості створює перспективу для впровадження нових сортів ячменю з ефективною генетичною стійкістю. Отримані дані заповнюють інформаційну прогалину щодо патогенної мінливості *Bgh* у Центральній Азії. Гени стійкості, до яких не виявлено вірулентності, можуть бути успішно використані в казахстанських селекційних програмах для створення сортів ячменю з довготривалою стійкістю до борошнистої роси (Rsaliyev et al., 2017).

У південно-східному та південно-західному Китаї борошниста роса є однією з основних хвороб ячменю. Протягом 2015–2019 років було виявлено 6 вірулентних патотипів, здатних долати ген стійкості *mlo-5* із частотою вірулентності 4,8% (7 із 147). Порівняно з результатами досліджень десятирічної давності частота вірулентних ізолятів для таких алелів стійкості, як *Mla3*, *mlo-5*, *Mla6+Mla14*, *Mla7+Mlk*, *Mlg+MlCP* та *Mla13+MlRu3+MlaRu4*, зросла від 0 до 25,8% (Wang et al., 2023a).

У 2020–2021 роках на Цинхай-Тибетському плоскогір'ї відзначено розширення популяції *Bgh* в Тибеті, що супроводжувалося підвищенням вірулентності та зменшенням генетичної різноманітності патогена. Генетичний аналіз різноманітності показав, що міжгрупова варіація становила 54,68%, а рівень генотипової гетерогенності між популяціями та всередині них – 23,90 та 21,42% відповідно. Ці результати свідчать про зміну структури популяції патогена, що може мати серйозні наслідки для стійкості сортів ячменю в цих регіонах (Wang et al., 2023b).

Висновки

Аналіз українських та іноземних публікацій укотре підтвердив важливість і актуальність оглядів вірулентності збудника *Blumeria graminis* f. sp. *hordei*. Дослідження української популяції патогена показали його високу генетичну різноманітність, що значною мірою зумовлено довготривалим використанням тих самих генів стійкості у вирощуваних сортах ячменю, а також активним повітряним перенесенням спор з інших регіонів.

На основі об'єднаних результатів аналізу вірулентності та резистентності було зро-

блено висновок, що ген вірулентності *Vp1* стає головним фактором, що сприяє підвищенню складності вірулентності та різноманітності патотипів у Центральній Європі.

Підтверджено стійкість генів *Mla3*, *Mlk*, *Sl-1*, *Mla1*. Часткове подолання стійкості було встановлено для комбінації генів *MILa+Mla7*. Ефективність гену *Mlr* було втрачено у Європі. Встановлено підвищення вірулентностей до нового гена стійкості *MLVe*. Вчені визначили новий ген стійкості й дали йому назву *mlmr*.

Особливо ефективним залишається лише один ген – *mlo*, який упродовж десятиліть не втрачає своєї ефективності ані в Україні, ані в країнах Центральної та Північної Європи. Його ефективність дуже стабільна навіть після 43 років його присутності в комерційних сортах незважаючи на те, що ці сорти переважали в Європі принаймні протягом останніх трьох десятиліть. Частка новоза-

реєстрованих сортів із цим геном зросла з 63% у 2006–2010 рр. до 83% протягом 2016–2020 рр.

Порівняльний аналіз із популяціями з Латвії, Литви, Словаччини, Чехії та Польщі підтверджує подібну динаміку: поява нових вірулентностей, висока швидкість поширення спор і складність генетичної структури популяцій. Дані свідчать, що ефективна селекція ячменю повинна базуватися на поєднанні неспецифічної тривалої стійкості (наприклад, гена *mlo*) та постійному регіональному моніторингу змін у популяції збудника.

Таким чином, стабільне вирощування ячменю в умовах постійної еволюції патогена потребує стратегічного використання стійких генотипів, упровадження нових джерел стійкості та безперервного моніторингу популяцій збудника борошнистої роси ячменю як в Україні, так і в Європі.

Список використаної літератури

Лісовий М.П., Кононенко Ю.М. Історичні етапи розвитку досліджень поліморфізму популяцій збудника борошнистої роси ярого ячменю. *Захист і карантин рослин*. 2006. Вип. 52. С. 49–63.

Лісовий М.П., Кононенко Ю.М. Поліморфізм вірулентності збудника борошнистої роси ячменю в Центральному Лісостепу України. *Вісник аграрної науки*. 2007. № 4. С. 15–18.

Brown J.K.M., Jørgensen J.H. A catalogue of mildew resistance genes in European barley varieties. Integrated Control of Cereal Mildews: Virulence and Their Change, Proceedings of the Second European Workshop on Integrated Control of Cereal Mildews. *Risø National Laboratory*; 1990. Roskilde, Denmark. P. 263–286.

Crop Protection. How to manage powdery mildew (*Erysiphe graminis*) in barley. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.adama.com/south-africa/en/learning/barley-farming/powdery-mildew-on-barley/> (дата звернення 12.04.2022).

Dreiseitl A., Křížanová K. Powdery mildew resistance genes in spring barley cultivars registered in Slovakia from 2000 to 2010. *Cereal Research Communications*. 2012. Vol. 40, № 4. P. 494–501. <https://doi.org/10.1556/CRC.2012.0008>.

Dreiseitl A. Pathogenic divergence of Central European and Australian populations of *Blumeria graminis* f. sp. *hordei*. *Annals of Applied Biology*. 2014. Vol. 165. № 3. P. 364–372. <https://doi.org/10.1111/aab.12141>.

Dreiseitl A. Rare Virulences of Barley Powdery Mildew Found in Aerial Populations in the Czech Republic from 2009 to 2014. *Genetics and Plant Breeding*. 2015a. Vol. 51. № 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.17221/254/2014-CJGPB>.

Dreiseitl A. Emerging *Blumeria graminis* f. sp. *hordei* pathotypes reveal 'Psaknon' resistance in European barley varieties. *The Journal of Agricultural Science*. 2015b. Vol. 1. № 6. P. 1–8. <https://doi.org/10.1017/S0021859615001069>.

Dreiseitl A. Great pathotype diversity and reduced virulence complexity in a Central European population of *Blumeria graminis* f. sp. *hordei* in 2015–2017. *European Journal of Plant Pathology*. 2018. Vol. 153. P. 801–811. <https://doi.org/10.1007/s10658-018-1593-6>.

Dreiseitl A. Great pathotype diversity and reduced virulence complexity in a Central European population of *Blumeria graminis* f. sp. *hordei* in 2015–2017. *European Journal of Plant Pathology*. 2019. Vol. 53. P. 801–811. <https://doi.org/10.1007/s10658-018-1593-6>.

Dreiseitl A. Powdery Mildew Resistance Genes in European Barley Cultivars Registered in the Czech Republic from 2016 to 2020. *Genes (Basel)*. 2022. Vol. 13. № 7. P. 1274. <https://doi.org/10.3390/genes13071274>.

- Dreiseitl A. Major Genes for Powdery Mildew Resistance in Research and Breeding of Barley: A Few Brief Narratives and Recommendations. *Journal of Fungi*, 2023a. Vol. 9. № 11. P. 1045. <https://doi.org/10.3390/jof9111045>.
- Dreiseitl A. Rare Virulences and Great Pathotype Diversity of a Central European *Blumeria hordei* Population. *Journal of Fungi*. 2023b. Vol. 9. № 11. P. 1045. <https://doi.org/10.3390/jof9111045>.
- Dreiseitl A. Major Genes for Powdery Mildew Resistance in Research and Breeding of Barley: A Few Brief Narratives and Recommendations. *Preprints.org*. 2025. <https://doi.org/10.20944/preprints202503.0642.v1>.
- Ellwood S.R., Lopez-Ruiz J.F., Tan Rare K. Barley powdery mildew control in Western Australia and beyond. *Plant Pathology*. 2024. Vol. 73. № 7. P. 1666–1674. <https://doi.org/10.1111/ppa.13884>.
- Czembor H.J. Odporność na mączniaka prawdziwego (*Blumeria graminis f.sp. hordei*) odmian jęczmienia włączonych do badań rejestrowych w Polsce w latach 2004–2006. *Biuletyn instytutu hodowli i aklimatyzacji roślin*. 2008. № 248. P. 33–42. <https://doi.org/10.37317/biul-2008-0055>.
- Czembor H.J., Czembor J.H., Pietrusinska A., Domeradzka O. Resistance to powdery mildew (*Blumeria graminis f.sp. hordei*) in barley cultivars included to registration trials in Poland in 2011. *Biuletyn Instytutu hodowli i aklimatyzacji roślin*. 2012. № 265. P. 23–33.
- Czembor J.H., Czembor E., Kisiela A., Wnuk E. Resistance to powdery mildew (*Blumeria graminis f. sp. hordei*) of spring barley varieties from the Post-registration Variety Testing program in 2022. *Biuletyn instytutu hodowli i aklimatyzacji roślin*. 2023. № 299. P. 29–37. <https://doi.org/10.37317/biul-2023-0004>.
- Kithsiri J. Management of barley powdery mildew in the face of fungicide resistance [Електронний ресурс]. URL: https://www.agric.wa.gov.au/search?search_api_views_fulltext=Management%20of%20barley%20powdery%20mildew%20in%20the%20face%20of%20fungicide%20resistance (дата звернення 10.04.2025).
- Kokina I., Rashal I. Trends of changes of genetic structure of the population of *Blumeria graminis f.sp. hordei* in the Latgale region of Latvia in 2003–2004. *Acta Biologica Universitatis Daugavpiliensis*. 2005. Vol. 5. № 2. P. 187–192.
- Kokina I., Rashal I. Results of monitoring of the population of *Blumeria graminis f.sp. hordei* in Latvia in 2009–2010. Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. *Natural Exact and Applied Sciences*. 2012. Vol. 66. № 1/2. P. 41–47.
- Kokina I., Rashal I., Statkeviciute G., Leistrumaite A. The peculiarities of genetic structure of the *Blumeria graminis f. sp. hordei* population in Lithuania. *Zemdirbyste Agriculture*. 2014. Vol. 101. № 4. P. 419–424. <https://doi.org/10.13080/z-a.2014.101.053>.
- Liatukas Ž., Leistrumaite A. Field resistance of spring barley cultivars to powdery mildew in Lithuania. *Biologia*. 2007. Vol. 62. № 6. P. 664–669. <https://doi.org/10.2478/s11756-007-0132-2>.
- Management of barley powdery mildew in the face of fungicide resistance. Western Australia Crop Sowing Guide. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.agric.wa.gov.au/barley/management-barley-powdery-mildew-face-fungicide-resistance> (дата звернення 12.04.2025).
- Marzani Q.A., Amin M.M., Fateh S.A. Evaluation the effects of powdery mildew caused by *Blumeria graminis f. sp. hordei* and cultivar on the barley lodging. *Plant Pathology*. 2023. Vol. 165. P. 233–240. <https://doi.org/10.1007/s10658-022-02601-y>.
- Murray G.M., Brennan J.P. Estimating disease losses to the Australian barley industry. *Australasian Plant Pathology*. 2010. Vol. 39. P. 85–96.
- Piechota U., Słowacki P., Czembor P.C. Identification of a novel recessive gene for resistance to powdery mildew (*Blumeria graminis f. sp. hordei*) in barley (*Hordeum vulgare*). *Plant Breeding*. 2020. Vol. 139. P. 730–742. <https://doi.org/10.1111/pbr.12819>.
- Rashal I., Kokina I., Ajaia I. Trends of the changes of the virulence genes frequencies in the Latvian population of *Blumeria graminis f.sp. hordei*. *Agronomijas vestis (Latvian Journal of Agronomy)*. 2004. № 7. P. 79–83.
- Rsaliyev A., Pahratdinova Z., Rsaliyev S. Characterizing the pathotype structure of barley powdery mildew and effectiveness of resistance genes to this pathogen in Kazakhstan. *Plant Biology*. 2017. Vol. 17. P. 178. <https://doi.org/10.1186/s12870-017-1130-3>.
- Tratwal A., Bocianowski J. *Blumeria graminis f. sp. hordei* virulence frequency and the powdery mildew incidence on spring barley in the Wielkopolska province. *Journal of plant protection research*. 2014. Vol. 54, № 1. P. 28–35. <https://doi.org/10.2478/jppr-2014-0005>.
- Wang Y., Zhang G., Wang F., Lang X., Zhao X., Zhu J., Hu C., Hu J., Zhang Y., Yao X., Liu H., Ma T., Niu Y., Wang Z., Feng J., Wangmu, Lin R. Virulence Variability and Genetic Diversity in

Blumeria graminis f. sp. *hordei* in Southeastern and Southwestern China. *Plant Disease*. 2023a. Vol. 107. № 3. P. 809–819. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-22-0944-RE>.

Wang Y., Zhuoma Q., Xu Z., Peng Y., Wang M. Virulence and Genetic Types of *Blumeria graminis* f. sp. *hordei* in Tibet and Surrounding Areas. *Fungi (Basel)*. 2023b. Vol. 16. № 3. P. 363. <https://doi.org/10.3390/jof9030363>.

References

Lisovyj, M.P., & Kononenko, Ju.M. (2006). Istorychni etapy rozvytku doslidzhenj polimorfizmu populacij zbudnyka boroshnystoji rosy jarogho jachmenju [Historical stages of development of studies of polymorphism of populations of the pathogen of powdery mildew of spring barley]. *Zakhyst i karantyn roslyn [Plant protection and quarantine]*, 52, 49–63 [in Ukrainian].

Lisovyj, M.P., & Kononenko, Ju.M. (2007). Polimorfizm virulentnosti zbudnyka boroshnystoji rosy jachmenju v Centralnomu Lisostepu Ukrainy [Polymorphism of virulence of the barley powdery mildew pathogen in the Central Forest-Steppe of Ukraine] *Visnyk aghramoji nauky [Bulletin of Agricultural Science]*, 4, 15–18 [in Ukrainian].

Brown, J.K.M., & Jørgensen, J.H. (1990). A catalogue of mildew resistance genes in European barley varieties. Integrated Control of Cereal Mildews: Virulence and Their Change, Proceedings of the Second European Workshop on Integrated Control of Cereal Mildews. *Risø National Laboratory*; Roskilde, Denmark. P. 263–286 [in English].

Crop Protection. How to manage powdery mildew (*Erysiphe graminis*) in barley [Electronic resource] URL: <https://www.adama.com/south-africa/en/learning/barley-farming/powdery-mildew-on-barley> (access date 12.04.2022) [in English].

Dreiseitl, A., & Križanová, K. (2012). Powdery mildew resistance genes in spring barley cultivars registered in Slovakia from 2000 to 2010. *Cereal Research Communications*, 40 (4), 494–501. <https://doi.org/10.1556/CRC.2012.0008> [in English].

Dreiseitl, A. (2014). Pathogenic divergence of Central European and Australian populations of *Blumeria graminis* f. sp. *hordei*. *Annals of Applied Biology*, 165 (3), 364–372. <https://doi.org/10.1111/aab.12141> [in English].

Dreiseitl, A. (2015a). Rare Virulences of Barley Powdery Mildew Found in Aerial Populations in the Czech Republic from 2009 to 2014. *Genetics and Plant Breeding*, 51 (1), 1–8. <https://doi.org/10.17221/254/2014-CJGPB> [in English].

Dreiseitl, A. (2015b). Emerging *Blumeria graminis* f. sp. *hordei* pathotypes reveal ‘Psaknon’ resistance in European barley varieties. *The Journal of Agricultural Science*, 1 (6), 1–8. <https://doi.org/10.1017/S0021859615001069> [in English].

Dreiseitl, A. (2018). Great pathotype diversity and reduced virulence complexity in a Central European population of *Blumeria graminis* f. sp. *hordei* in 2015–2017. *European Journal of Plant Pathology*, 153, 801–811. <https://doi.org/10.1007/s10658-018-1593-6> [in English].

Dreiseitl, A. (2019). Great pathotype diversity and reduced virulence complexity in a Central European population of *Blumeria graminis* f. sp. *hordei* in 2015–2017. *European Journal of Plant Pathology*, 53, 801–811. <https://doi.org/10.1007/s10658-018-1593-6> [in English].

Dreiseitl, A. (2022). Powdery Mildew Resistance Genes in European Barley Cultivars Registered in the Czech Republic from 2016 to 2020. *Genes (Basel)*, 13 (7), 1274. <https://doi.org/10.3390/genes13071274> [in English].

Dreiseitl, A. (2023a). Major Genes for Powdery Mildew Resistance in Research and Breeding of Barley: A Few Brief Narratives and Recommendations. *Journal of Fungi*, 9 (11), 1045. <https://doi.org/10.3390/jof9111045> [in English].

Dreiseitl, A. (2023b). Rare Virulences and Great Pathotype Diversity of a Central European *Blumeria hordei* Population. *Journal of Fungi*, 9 (11), 1045. <https://doi.org/10.3390/jof9111045> [in English].

Dreiseitl, A. (2025). Major Genes for Powdery Mildew Resistance in Research and Breeding of Barley: A Few Brief Narratives and Recommendations. *Preprints.org*. <https://doi.org/10.20944/preprints202503.0642.v1> [in English].

Ellwood, S.R., Lopez-Ruiz, J.F., & Tan Rare, K. (2024). Barley powdery mildew control in Western Australia and beyond. *Plant Pathology*, 73 (7), 1666–1674. <https://doi.org/10.1111/ppa.13884> [in English].

Czembor, H.J. (2008). Odporność na mączniaka prawdziwego (*Blumeria graminis* f.sp. *hordei*) odmian jęczmienia włączonych do badań rejestrowychw Polsce w latach 2004–2006 [Resistance

to powdery mildew (*Blumeria graminis* f.sp. *hordei*) of barley varieties included in the registration studies in Poland in 2004–2006]. *Biuletyn instytutu hodowli i aklimatyzacji roślin* [Bulletin of the Institute of Plant Breeding and Acclimatization], 248, 33–42. [https://doi.org/ 10.37317/biul-2008-0055](https://doi.org/10.37317/biul-2008-0055) [in Polish].

Czembor, H.J., Czembor, J.H., Pietrusinska, A., & Domeradzka, O. (2012). Resistance to powdery mildew (*Blumeria graminis* f.sp. *hordei*) in barley cultivars included to registration trials in Poland in 2011. *Biuletyn Instytutu hodowli i aklimatyzacji roślin*, 265, 23–33 [in English].

Czembor, J.H., Czembor, E., Kisiela, A., & Wnuk, E. (2023). Resistance to powdery mildew (*Blumeria graminis* f. sp. *hordei*) of spring barley varieties from the Post-registration Variety Testing program in 2022. *Biuletyn instytutu hodowli i aklimatyzacji roślin*, 299, 29–37. <https://doi.org/10.37317/biul-2023-0004> [in English].

Kithsiri J. Management of barley powdery mildew in the face of fungicide resistance [Electronic resource] URL: <https://www.agric.wa.gov.au/barley/management-barley-powdery-mildew-face-fungicide-resistance#> (access date 10.04.2025) [in English].

Kokina, I., & Rashal, I. (2005). Trends of changes of genetic structure of the population of *Blumeria graminis* f.sp. *hordei* in the Latgale region of Latvia in 2003–2004. *Acta Biologica Universitatis Daugavpiliensis*, 5 (2), 187–192 [in English].

Kokina, I., & Rashal, I. (2012). Results of monitoring of the population of *Blumeria graminis* f.sp. *hordei* in Latvia in 2009–2010. Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. *Natural Exact and Applied Sciences*, 66 (1/2), 41–47 [in English].

Kokina, I., Rashal, I., Statkeviciute, G., & Leistrumaite, A. (2014). The peculiarities of genetic structure of the *Blumeria graminis* f. sp. *hordei* population in Lithuania. *Zemdirbyste Agriculture*, 101 (4), 419–424. <https://doi.org/10.13080/z-a.2014.101.053> [in English].

Liatukas, Ž., & Leistrumaite, A. (2007). Field resistance of spring barley cultivars to powdery mildew in Lithuania. *Biologia*, 62 (6), 664–669. <https://doi.org/10.2478/s11756-007-0132-2> [in English].

Management of barley powdery mildew in the face of fungicide resistance. Western Australia Crop Sowing Guide. [Electronic resource] URL: <https://www.agric.wa.gov.au/barley/management-barley-powdery-mildew-face-fungicide-resistance> (access date 12.04.2025) [in English].

Marzani, Q.A., Amin, M.M., & Fateh, S.A. (2023). Evaluation the effects of powdery mildew caused by *Blumeria graminis* f. sp. *hordei* and cultivar on the barley lodging. *Plant Pathology*, 165, 233–240. <https://doi.org/10.1007/s10658-022-02601-y>.

Murray, G.M., & Brennan, J.P. (2010). Estimating disease losses to the Australian barley industry. *Australasian Plant Pathology*. 39, 85–96 [in English].

Piechota, U., Słowacki, P., & Czembor, P.C. (2020). Identification of a novel recessive gene for resistance to powdery mildew (*Blumeria graminis* f. sp. *hordei*) in barley (*Hordeum vulgare*). *Plant Breeding*, 139, 730–742. <https://doi.org/10.1111/pbr.12819>. [in English].

Rashal, I., Kokina, I., & Ajaia, I. (2004). Trends of the changes of the virulence genes frequencies in the Latvian population of *Blumeria graminis* f.sp. *hordei*. *Agronomijas vestis (Latvian Journal of Agronomy)*, 7, 79–83 [in English].

Rsaliev, A., Pahratdinova, Z., & Rsaliyev, S. (2017). Characterizing the pathotype structure of barley powdery mildew and effectiveness of resistance genes to this pathogen in Kazakhstan. *Plant Biology*, 17, 178. <https://doi.org/10.1186/s12870-017-1130-3> [in English].

Tratwal, A., & Bocianowski, J. (2014). *Blumeria graminis* f. sp. *hordei* virulence frequency and the powdery mildew incidence on spring barley in the Wielkopolska province. *Journal of plant protection research*, 54 (1), 28–35. [https://doi.org/ 10.2478/jppr-2014-0005](https://doi.org/10.2478/jppr-2014-0005) [in English].

Wang, Y., Zhang, G., Wang, F., Lang, X., Zhao, X., Zhu, J., Hu, C., Hu, J., Zhang, Y., Yao, X., Liu, H., Ma, T., Niu, Y., Wang, Z., Feng, J., Wangmu, Lin, R. (2023a). Virulence Variability and Genetic Diversity in *Blumeria graminis* f. sp. *hordei* in Southeastern and Southwestern China. *Plant Disease*, 107 (3), 809–819. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-22-0944-RE> [in English].

Wang, Y., Zhuoma, Q., Xu, Z., Peng, Y., & Wang, M. (2023b). Virulence and Genetic Types of *Blumeria graminis* f. sp. *hordei* in Tibet and Surrounding Areas. *Fungi (Basel)*, 16 (3), 363. <https://doi.org/10.3390/jof9030363> [in English].

Отримано: 25.04.2025
Прийнято: 15.05.2025



УДК 633.358

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.19>

СИМБІОТИЧНА ПРОДУКТИВНІСТЬ ГОРОХУ ЯРОГО ЗАЛЕЖНО ВІД АГРОТЕХНІЧНИХ ЧИННИКІВ В УМОВАХ ЛІСОСТЕПУ ЗАХІДНОГО

К. С. Небаба¹

Інокулянти для бобових культур головний рушій інтенсивних технологій за останні десятиліття. Застосування біопрепаратів приводить до кращого утворення бульбочок на коренях і збільшення їхньої маси, що має значний вплив на формування симбіотичного апарату. Вирощування зернобобових, гороху також, у сівоzmіні дозволяє практично цілком виключити використання мінеральних азотних добрив.

У статті представлено результати досліджень із вивчення впливу передпосівних препаратів і мікродобрив на формування симбіотичної продуктивності гороху посівного сортів Есо та Гамбіт, які проводилися впродовж 2020–2024 років на дослідному полі «Поділля» Закладу вищої освіти «Подільський державний університет».

Метою досліджень було вивчення впливу передпосівних препаратів і мікродобрив на формування симбіотичного апарату рослин гороху посівного ярого типу в умовах Правобережного Лісостепу України.

З мікростадій ВВСН 13–14 бульбочки почали утворюватися на коренях, але цей процес був повільний. За дії передпосівних препаратів, як-от: Мікофренд, Нітрофікс і Ризоактив Бобові, упродовж вегетаційного періоду рослин гороху сортів Есо та Гамбіт показники симбіотичної продуктивності зростали й досягли максимуму в мікростадіях ВВСН 60–69. Починаючи з фази наливу зерна (мікростадії ВВСН 70–79) нові бульбочки не утворювалися, процес фіксування біологічного азоту став зупинятися.

Встановлено, передпосівний обробіток насіння гороху препаратом Мікофренд у комплексі з інокулянтами Нітрофікс і Ризоактив Бобові, за дії мікродобрив Найс і Авангард, максимальну кількість загалом та кількість активних кореневих бульбочок було сформовано в мікростадіях ВВСН 60–69. У сорту Есо ці показники коливалися в межах 56,3–78,3 шт./рослину, з них 46,9–59,5 шт./рослину були активними; у сорту Гамбіт – 52,4–59,5 шт./рослину та 43,6–59,5 шт./рослину відповідно. На варіанті абсолютний контроль у даній мікростадії залежно від сорту загальна кількість сформованих бульбочок була 28,9–31,1 шт./рослину, активних – 24,5–26,3 шт./рослину.

Ключові слова: горох, інокулянти, мікродобрива, кореневі бульбочки, симбіотичний потенціал.

¹ кандидат сільськогосподарських наук,
асистент кафедри рослинництва, селекції та насінництва
(Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський)
e-mail: agronebaba@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4529-3623

SYMBIOTIC PRODUCTIVITY OF SPRING FIELD PEAS DEPENDING ON AGRONOMIC FACTORS UNDER CONDITIONS OF THE WESTERN FOREST-STEPPE

K. S. Nebaba

Inoculants for leguminous crops have been the main driver of intensive technologies over the past decades. The use of biological products leads to improved nodule formation on the roots and an increase in their mass, which significantly impacts the development of the symbiotic system. The cultivation of grain legumes, including peas, in crop rotation allows for the near-complete elimination of mineral nitrogen fertilisers.

This article presents the results of a study on the effect of pre-sowing treatments and micronutrients on the formation of symbiotic productivity in field peas of the varieties ESO and HAMBIT. The research was conducted from 2020 to 2024 at the "Podillia" experimental field of "Podillia State University".

The study aimed to investigate the effect of pre-sowing treatments and micronutrient fertilizers on the formation of the symbiotic apparatus of spring-type field peas under the conditions of the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine.

From BBCH microstages 13–14, nodules began to form on the roots, but this process was slow. Under the influence of pre-sowing treatments – MIKOFREND, NITROFIKS and RYZOAKTYV BOBOV I – during the vegetation period of pea plants of the ESO and HAMBIT varieties, the indicators of symbiotic productivity increased and reached their maximum at BBCH microstages 60–69. Starting from the grain-filling phase (BBCH microstages 70–79), no new nodules were formed, and the process of biological nitrogen fixation began to decline.

It was found that pre-sowing seed treatment with MIKOFREND in combination with the inoculants NITROFIKS and RYZOAKTYV BOBOVI, and the application of the micronutrients NAIS and AVANHARD, resulted in the highest total number and number of active root nodules at the BBCH 60–69 growth stages. These indicators ranged from 56,3 to 78,3 nodules per plant for the ESO variety, with 46,9 to 59,5 active; for the HAMBIT variety, from 52,4 to 59,5 and 43,6 to 59,5, respectively. In the control variant, depending on the array, the total number of nodules formed during this stage was 28,9–31,1 per plant, with 24,5–26,3 active.

Key words: peas, inoculants, micronutrients, root nodules, symbiotic potential.

Вступ

Бульбочкові бактерії ініціюють утворення на коренях гороху спеціалізованих органів – бульбочок, після чого між рослиною та бактеріями виникає симбіоз: бактерії зв'язують атмосферний молекулярний азот, передають його рослині, яка, у свою чергу, забезпечує їх поживними речовинами (Nebaba et al., 2025).

Для доброї діяльності азотфіксуючих кореневих бульбочок необхідні оптимальні умови, передусім достатня вологість ґрунту на початку вегетації – щонайменше 50–60% від повної вологоємності, його аерація в зоні утворення бульбочок, оскільки бульбочкові бактерії не формуються в сухому ґрунті. Також важливою умовою є забезпечення рослин гороху макро- та мікроелементами (Вуйко, 2023).

Фіксація молекулярного азоту симбіотичними й аґрунтовими діазотрофними мікроорганізмами – єдиний екологічно чистий і відносно недорогий спосіб забезпечення рослин поживними речовинами (Коваленко, 2021; Фурман, 2021).

Потужний розвиток симбіотичного апарату гороху й інших зернобобових культур залежить від впливу окремих елементів технології вирощування (Bahar et al., 2024). Обробка насіння мікоризоутворювальними препаратами дає змогу збільшити площу поглинання кореневою системою елементів живлення та вологи завдяки розвитку мікоризи, утримувати її в кореневій зоні рослини. Увесь азот, що фіксується бактеріями в бульбочці, поступає одразу в цитоплазму рослин, тому азотфіксація є не лише найбільш екологічним способом забезпечення рослин азотом, а й найбільш ефективним з погляду транспортування до рослини (Didur et al., 2020).

Матеріал і методи

Дослідження з вивчення впливу передпосівних препаратів і позакореневого живлення посівів рослин гороху посівного проводили впродовж 2020–2024 рр. в умовах науково-дослідного центру «Поділля».

Ґрунт дослідного поля – чорнозем типовий, глибокий малогумусний важкосуглинковий на лесовидних суглинках. Посівна

площа елементарної ділянки – 50 м², облікової – 48 м². Попередник – пшениця озима. Насіння гороху сортів Есо та Гамбіт висівали зерновою сівалкою, звичайним рядковим способом із шириною міжрядь 15 см, із глибиною загортання насіння 5–6 см. Норма висіву – 1,2 млн/га схожих насінин. Після сівби на 2-й день площу посіву коткували кільчастим котком.

Середньоранній сорт інтенсивного, безлисточкового типу Есо має попит в Україні завдяки стійкості до вилягання, посухи й осипання. Зерно даного сорту жовтого кольору. Рекомендовані зони вирощування – Полісся, Лісостеп, Степ. Середня кількість бобів коливається в межах 6–8 шт. зерен, середня висота рослин – 100 см, маса 1 000 насінин – 240–250 г, вегетаційний період рослин у середньому становить 107–110 діб, залежно від зони вирощування.

Безлисточковий сорт гороху Гамбіт інтенсивного, прямостоячого типу, стійкий до вилягання, до осипання зерна, також придатний до прямого комбайнування. Рослини сорту Гамбіт мають біологічні характеристики, які дозволяють вирощувати його в усіх кліматичних зонах України. Середня кількість зерен у бобі – 6–7 шт., висота рослин – 103–105 см, маса 1 000 насінин – 270–280 г, вегетаційний період – 106–112 діб.

У досліді вивчали взаємодію трьох факторів (табл. 1).

Таблиця 1
Схема польового досліді

Фактор А: обробка насіння	Фактор В: мікродобрива
A ₁ – контроль	C ₁ – контроль
A ₂ – Мікофренд	C ₂ – Найс
B ₂ – Нітрофікс	C ₃ – Авангард
B ₃ – Ризоактив Бобові	

Результати

У польових умовах процес утворення кореневих бульбочок на головному та бічних коренях рослин гороху розпочався в мікростадії ВВСН 09, на початкових фазах азотфіксація відбувалася повільно (з мікростадій ВВСН 13–14). Упродовж вегетаційного періоду рослин біологічна фіксація азоту зростала завдяки активності бульбочкових бактерій у сирій масі кореневих бульбочок, досягла максимуму у фазі повного цвітіння (мікростадії ВВСН 60–69) та закінчилася

до початку наливу зерна (мікростадії ВВСН 70–79) (Небаба, 2022).

Встановлено, не всі бульбочки, що сформувалися на коренях, були азотфіксуючими, тобто активними. Якщо вони мають рожеве забарвлення, то їх можна віднести до групи активних, якщо ж бульбочки зеленкуватого або сірого кольору, то азотфіксація в них не відбувається.

За роки досліджень у сорту гороху Гамбіт загальна кількість кореневих бульбочок і кількість із них активних залежала від погодних умов і агротехнологічних чинників. У мікростадіях ВВСН 51–59 найменше їх утворилося на варіанті абсолютний контроль (без застосування досліджуваних препаратів): 27,9–36,5 шт./рослину, з них 18,5–19,7 шт./рослину були активними. За обробки насіння мікоризуювальним препаратом Мікофренд кількість бульбочок зросла в середньому на 7,3–11,0 шт./рослину. За обробки насіння інокулянтами Нітрофікс і Ризоактив Бобові ці показники були вищими в середньому на 12,0–18,2 шт./рослину (табл. 2).

Кількість кореневих бульбочок активно збільшувалася до мікростадій ВВСН 60–69 і досягла максимальних показників. На дослідних ділянках, де обробляли насіння мікоризуювальним препаратом та інокулянтами, загальна кількість бульбочок у середньому становила 52,4–54,2 шт./рослину, активних – 43,6–44,6 шт./рослину. Фоліарне живлення мікродобривами Найс і Авангард мало позитивний вплив на формування кореневих бульбочок, загальна їх кількість збільшилася в середньому на 31,6–39,4%, кількість активних – на 22,0–24,7%.

Упродовж 2020–2024 рр. на коренях рослин гороху сорту Есо бульбочки краще формувалися, а їх кількість була більшою. Так, на варіанті абсолютний контроль у мікростадіях ВВСН 51–59 утворилося 36,5 шт./рослину, з них 19,7 шт./рослину були активними. Після обприскування мікродобривами Найс і Авангард загальна кількість збільшилася до 49,6–52,1 шт./рослину та 24,4–26,7 шт./рослину відповідно. Обробка насіння препаратами Мікофренд, Нітрофікс і Ризоактив Бобові сприяла кращому формуванню кореневих бульбочок. На цьому варіанті удобрення показники загальної кількості коливалися в межах 37,0–57,1 шт./рослину, активних – 31,5–44,6 шт./рослину. Обприскування посівів мікродобривами Найс і Авангард пози-

Таблиця 2

Кількість кореневих бульбочок на рослинах гороху сорту Гамбіт залежно від технологічних заходів, шт./рослину (середнє за 2020–2024 рр.)

Фактор А Обробка насіння	Фактор В Мікродобрива	Кількість бульбочок					
		загальна			активна		
		ВВСН 51–59	ВВСН 60–69	ВВСН 70–79	ВВСН 51–59	ВВСН 60–69	ВВСН 70–79
Контроль	контроль	27,9	28,9	8,6	18,5	24,5	5,2
	Найс	37,8	39,2	12,3	23,0	33,7	9,8
	Авангард	41,0	42,5	14,8	25,1	36,5	11,0
Мікофренд	контроль	34,4	35,6	12,4	29,6	28,5	9,9
	Найс	42,3	43,8	15,8	32,3	36,1	13,1
	Авангард	44,6	45,2	17,0	34,8	36,9	14,5
Мікофренд + Нітрофікс	контроль	50,6	52,4	15,1	36,9	43,6	12,8
	Найс	58,2	60,3	19,5	41,0	50,5	16,9
	Авангард	62,5	64,8	21,3	42,5	54,6	17,3
Мікофренд + Ризоактив Бобові	контроль	52,6	54,5	17,6	41,6	44,6	13,9
	Найс	65,7	68,1	21,0	49,2	56,3	16,4
	Авангард	69,8	72,3	22,6	53,7	59,5	17,5
Нітрофікс	контроль	38,1	39,5	14,6	28,1	32,8	11,5
	Найс	49,2	51,0	19,1	36,7	42,2	14,8
	Авангард	51,5	53,4	21,5	39,0	44,1	15,9
Ризоактив Бобові	контроль	42,1	43,6	16,0	33,5	35,6	12,3
	Найс	51,3	53,2	20,9	40,5	43,5	15,9
	Авангард	53,8	55,8	22,8	43,8	45,3	16,4

тивно впливало на розвиток і формування нодуляційного апарату (краще утворення бульбочок на коренях рослин гороху) і, як наслідок, його активного функціонування. Загальна кількість бульбочок збільшувалася, отже, збільшувалася й кількість активних, їхні розміри, порівняно з контролем, показники становили 45,6–75,8 шт./рослину. Найбільше кореневих бульбочок було у фазу цвітіння. На контрольних варіантах загальна кількість була в межах від 31,1 до 59,0 шт./рослину, активних – від 26,3 до 49,6 шт./рослину (табл. 3).

Після фази цвітіння, починаючи з фази наливу зерна, бульбочки перестають формуватися, їх кількість суттєво зменшується, фіксація азоту із ґрунту припиняється (Khomina et al., 2024). Нами встановлений позитивний вплив обробки насіння і фоліарного живлення на загальну кількість бульбочок та їхню активність у мікростадіях ВВСН 71–79. На контрольному варіанті живлення в сорту Гамбіт – 5,2 шт./рослину рожевих бульбочок за загальної кількості 8,6 шт./рослину, після застосування мікродобрив Найс і Авангард показники були

такі: 9,8 шт./рослину за загальної кількості 12,3; 11,0 шт./рослину за загальної кількості 14,8 шт./рослину відповідно. Для сорту Есо ці показники збільшилися в середньому на 14,2–26,3%. Вищими показниками були в сорту Есо на варіанті Мікофренд + Ризоактив + Авангард Бобові, де загальна кількість бульбочок становила 25,8 шт./рослину, з них 19,5 шт./рослину були активними. Дещо меншими ці показники були в сорту Гамбіт 22,6 шт./рослину, з них активних – 17,5 шт./рослину.

Обговорення

Бінарна композиція мікоризоутворювального препарату й інокулянтів – важливі елементи для формування симбіотичного апарату, як уважає (Коць, 2016). Науковці (Маменко, 2017; Дідур і Зюзько, 2025) доводять, що засвоєний біологічний азот виноситься врожаєм зерна, проте 23–40% азоту все ж залишається у ґрунті разом з органічними рештками рослин. За період активної фіксації біологічного азоту рослини гороху можуть зафіксувати від 100 до 180 кг/га.

У разі браку біологічного азоту зернобобові культури, що акумулюють фіксований азот,

Таблиця 3

Кількість кореневих бульбочок на рослинах гороху сорту Есо залежно від технологічних заходів, шт./рослину (середнє за 2020–2024 рр.)

Фактор А Обробка насіння	Фактор В Мікродобрива	Кількість бульбочок					
		загальна			активна		
		ВВСН 51–59	ВВСН 60–69	ВВСН 70–79	ВВСН 51–59	ВВСН 60–69	ВВСН 70–79
Контроль	контроль	36,5	31,1	10,2	19,7	26,3	5,7
	Найс	49,6	42,1	15,6	24,4	36,9	10,7
	Авангард	52,1	45,7	16,9	26,7	38,2	12,0
Мікофренд	контроль	37,0	38,3	16,3	31,5	30,6	10,8
	Найс	45,6	47,1	18,0	34,3	40,4	14,3
	Авангард	48,0	48,6	19,5	37,0	41,0	15,9
Мікофренд + Нітрофікс	контроль	54,5	56,3	18,6	39,2	46,9	14,0
	Найс	62,7	64,8	23,5	43,6	54,7	18,5
	Авангард	67,4	69,7	25,9	45,2	58,3	18,9
Мікофренд + Ризоактив Бобові	контроль	57,1	59,0	21,4	44,6	49,6	15,5
	Найс	71,4	73,8	24,3	52,8	60,4	18,3
	Авангард	75,8	78,3	25,8	57,6	62,8	19,5
Нітрофікс	контроль	41,4	42,8	17,5	30,2	38,4	12,8
	Найс	53,4	55,2	22,0	39,4	47,9	16,5
	Авангард	56,0	57,8	23,7	41,9	49,3	17,8
Ризоактив Бобові	контроль	45,7	47,2	19,3	36,0	39,6	13,7
	Найс	55,8	57,6	24,6	43,5	48,5	17,8
	Авангард	58,5	60,4	26,3	47,0	51,2	18,3

перетворюються на культуру, яка споживає азот ґрунту. Тому застосування бактеріальних препаратів не виключає внесення помірних доз азотних мінеральних добрив, оскільки неналежна концентрація цього елемента живлення, особливо на початкових етапах росту рослини, часто є причиною низької інтенсивності процесу фотосинтезу (Фурман та ін., 2022). Проте точні норми, дози та строки внесення азотних добрив залежать від сорту й умов вирощування, що зумовлено складністю та багатостадійністю формування і функціонування бобово-ризобіальних структур (Забарна, 2020; Німенко і Грабовський, 2023).

Багатьма вченими визначено, що високі концентрації мінерального азоту у ґрунті

інгібують формування симбіозу, знижують його ефективність або й призводять до остаточного припинення симбіотичних відносин унаслідок зменшення розміру бактероїдів і швидкого старіння бактероїдних тканин (Vakhnyak et al., 2024).

Висновки

Доведено, що не всі бульбочки, які сформувалися на коренях рослин гороху, є азотфіксувальними. Обробка насіння та позакореневе живлення позитивно впливали на формування корневих бульбочок і їх активність. В умовах Лісостепу Західного симбіотична продуктивність гороху ярого сортів Гамбіт і Есо залежала від чинників, які вивчалися.

Список використаної літератури

Вуйко О.М. Симбіотична активність гороху посівного залежно від сортового складу та передпосівної обробки. Аграрні інновації. 2023. № 22. С. 20–24. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.22.3>.

Дідур І.М., Зюзько Л.Г. Накопичення та баланс азоту у ґрунті при вирощуванні сої в умовах Лісостепу Правобережного. Таврійський науковий вісник. 2025. № 141. Ч. 1. С. 72–77. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.141.1.10>.

Забарна Т.А. Вплив позакореневих підживлень на показники симбіотичної діяльності сої. *Польський науковий журнал*. 2020. № 25. С. 6–11.

Коваленко О.А. Застосування мікродобрих та біопрепаратів у зоні Південного Степу України за вирощування гороху. *Сільське господарство і лісівництво*. 2021. № 22. С. 22–23. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2022.11.2>.

Коць С.Я. Дослідження біологічної фіксації азоту в Інституті фізіології рослин і генетики НАН України. *Фізіологія рослин і генетика*. 2016. № 48 (3). С. 215–231. <https://doi.org/10.1407/frg2018.06.463>.

Маменко П.М. Інокуляція гороху: маркетинговий хід чи реально прибуткова справа? *Агробізнес сьогодні*. 2017 [Електронний ресурс]. URL: <http://agro-business.com.ua/2017-09-29-05-56-43/item/2478-inokuliatsiiahorokhu-marketynhovyi-khid-chy-realno-prybutkova-sprava.html> (дата звернення: 02.04.2025).

Небаба К.С. Загальний і активний симбіотичний потенціал гороху посівного залежно від технологічних прийомів в умовах Лісостепу Західного. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Агрономія і біологія»*. 2022. № 46 (4). С. 49–54. <https://doi.org/10.32845/agrobio.2021.4.7>.

Німенко С.С., Грабовський М.Б. Формування симбіотичного апарату сортів сої за органічного вирощування. *Аграрні інновації*. 2023. № 18. С. 89–97. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.18.13>.

Фурман В.А., Фурман О.В., Губар М.І., Свистунова І.В. Вплив інокуляції та удобрення на формування симбіотичної та насінневої продуктивності сої. *Таврійський науковий вісник*. 2022. № 123. С. 137–145.

Фурман О.В. Симбіотична продуктивність та урожайність насіння сої залежно від інокуляції та удобрення. *Таврійський науковий вісник*. 2021. № 118. С. 200–205.

Bahan A., Shakalii S., Yurchenko S., Marenych M., Mykhailenko H. The effect of humic growth stimulants on the productivity of chickpea (*Cicer arietinum* L.) varieties. *Scientific Horizons*. 2024. Vol. 27. Issue 7. P. 53–61. <https://doi.org/10.48077/scihor7.2024.53>.

Didur I., Bakhmat M., Chynchyk O., Pantsyryeva H., Telekalo N., Tkachuk O. Substantiation of agroecological factors on soybean agrophytocenoses by analysis of variance of the Right-Bank Forest-Steppe in Ukraine. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020. Vol. 10. Issue 5. P. 177–182. https://doi.org/10.15421/2020_206.

Khomina V., Lapchynskiy V., Nebaba K., Pustova Z., Plahtiy D. Microbial inoculants as a means of improving soil and crop yields. *Scientific Horizons*. 2024. Vol. 27. Issue 10. P. 79–90. <https://doi.org/10.48077/scihor10.2024.79>.

Nebaba K., Khmelianchyshyn Yu., Panasiuk R., Puczel J., Koberniuk O. Influence of biostimulants on physiological processes, productivity, and quality of pea crop in modern agriculture. *Scientific Horizons*. 2025. Vol. 28. Issue 1. P. 61–72. <https://doi.org/10.48077/scihor1.2025.61>.

Vakhnyak V., Khomovyi M., Trach I., Yavorov V., Petryshche O. The role of restoring degraded soils in ensuring food security in the agro-industrial sector. *Scientific Horizons*. 2025. Vol. 28. Issue 2. P. 73–88. <https://doi.org/10.48077/scihor2.2025.73>.

References

Vujko, O.M. (2023). Symbiotychna aktyvnist horokhu posivnoho zalezno vid sortovoho skladu ta peredposivnoi obrobky [Symbiotic activity of field peas depending on varietal composition and pre-sowing treatment]. *Ahrarni Innovatsii [Agricultural innovations]*, 22, 20–24. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.22.3> [in Ukrainian].

Didur, I.M., & Ziuzko, L.H. (2025). Nakopychennia ta balans azotu v gruntі pry vyroshchuvanni soi v umovakh Lisostepu Pravoberezhnoho [Accumulation and balance of nitrogen in the soil during soybean cultivation in the conditions of the right-bank forest-steppe]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk [Tavria Scientific Bulletin]*, 141 (1), 72–77. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.141.1.10> [in Ukrainian].

Zabarna, T.A. (2020). Vplyv pozakorenovykh pidzhyvlien na pokaznyky symbiotychnoi diialnosti soi [The effect of foliar fertilisation on the symbiotic activity of soybeans]. *Polskyi naukovyi zhurnal [Polish journal of science]*, 25, 6–11 [in Ukrainian].

Kovalenko, O.A. (2021). Zastosuvannia mikrodobryv ta biopreparativ v zoni pivdennoho stepu Ukrainy za vyroshchuvannia horokhu [Application of microfertilizers and biological products in the

southern steppe zone of Ukraine for growing peas]. *Sil'ske hospodarstvo i lisivnytstvo* [Agriculture and forestry], 22, 22–23. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2022.11.2> [in Ukrainian].

Kots', S.Ya. (2016). *Doslidzhennia biolohichnoi fiksatsii azotu v Instytuti fiziologii roslyn i henetyky NAN Ukrainy* [Research into biological nitrogen fixation at the Institute of Plant Physiology and Genetics of the NAS of Ukraine]. *Fiziologhiia roslyn i henetyka* [Plant physiology and genetics], 48 (3), 215–231. <https://doi.org/10.1407/frg2018.06.463> [in Ukrainian].

Mamenko, P.M. (2017). *Inokuliatsiia horokhu: marketynhovyi khid chy real'no prybutkova sprava?* [Pea inoculation: a marketing ploy or a profitable business?]. *Ahrobiznes sohodni* [Agribusiness today]. [Electronic resource] URL: <https://surl.lu/hclnfs> (access date 02.04.2025) [in Ukrainian].

Nebaba, K.S. (2022). *Zahalnyi i aktyvnyi symbiotychnyi potentsial horokhu posivnoho zalezno vid tekhnolohichnykh pryomiv v umovakh Lisostepu Zakhidnoho* [General and active symbiotic potential of field peas depending on technological methods in the conditions of the Western Forest-Steppe]. *Visnyk Sums'koho natsional'noho ahrarnoho universytetu. Seriiia "Ahronomiia i biolohiia"* [Bulletin of Sumy National Agrarian University], 46 (4), 49–54. <https://doi.org/10.32845/agrobio.2021.4.7> [in Ukrainian].

Nimenko, S.S., & Hrabovskyi, M.B. (2023). *Formuvannia symbiotychnoho aparatu sortiv soi za orhanichnoho vyroshchuvannia* [Formation of symbiotic apparatus of soybean varieties under organic cultivation]. *Ahrarni innovatsii* [Agricultural innovations], 18, 89–97. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.18.13> [in Ukrainian].

Furman, V.A., Furman, O.V., Hubar, M.I., & Svystunova, I.V. (2022). *Vplyv inokuliatsii ta udobrennia na formuvannia symbiotychnoi ta nasinnevoi produktyvnosti soi* [The influence of inoculation and fertilisation on the formation of symbiotic and seed productivity of soybean]. *Tavriiskyi naukovi visnyk* [Tavria Scientific Bulletin], 123, 137–145 [in Ukrainian].

Furman, O.V. (2021). *Symbiotychna produktyvnist ta urozhainist nasinnia soi zalezno vid inokuliatsii ta udobrennia* [Symbiotic productivity and yield of soybean seeds depending on inoculation and fertilisation]. *Tavriiskyi naukovi visnyk* [Tavria Scientific Bulletin], 118, 200–205 [in Ukrainian].

Bahan, A., Shakalii, S., Yurchenko, S., Marenych, M., & Mykhailenko, H. (2024). The effect of humic growth stimulants on the productivity of chickpea (*Cicer arietinum* L.) varieties. *Scientific Horizons*, 27 (7), 53–61. <https://doi.org/10.48077/scihor7.2024.53> [in English].

Didur, I., Bakhmat, M., Chynchyk, O., Pansyryeva, H., Telekalo, N., & Tkachuk, O. (2020). Substantiation of agroecological factors on soybean agrophytocenoses by analysis of variance of the Right-Bank Forest-Steppe in Ukraine. *Ukrainian Journal of Ecology*, 10 (5), 177–182. https://doi.org/10.15421/2020_206 [in English].

Khomina, V., Lapchynskyi, V., Nebaba, K., Pustova, Z., & Plahtiy, D. (2024). Microbial inoculants as a means of improving soil and crop yields. *Scientific Horizons*, 27 (10), 79–90. <https://doi.org/10.48077/scihor10.2024.79> [in English].

Nebaba, K., Khmelianchyshyn, Yu., Panasiuk, R., Puczel, J., & Koberniuk, O. (2025). Influence of biostimulants on physiological processes, productivity, and quality of pea crop in modern agriculture. *Scientific Horizons*, 28 (1), 61–72. <https://doi.org/10.48077/scihor1.2025.61> [in English].

Vakhnyak, V., Khomovyi, M., Trach, I., Yavorov, V., & Petryshche, O. (2025). The role of restoring degraded soils in ensuring food security in the agro-industrial sector. *Scientific Horizons*, 28 (2), 73–88. <https://doi.org/10.48077/scihor2.2025.73> [in English].

Отримано: 24.04.2025

Прийнято: 15.05.2025



Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 12
Український журнал природничих наук
№ 12

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

УДК 631.526.32: 633.34:631.8
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.20>

СИМБІОТИЧНА АКТИВНІСТЬ БАКТЕРІЙ РОДУ *BRADYRHIZOBIUM* НА РОСЛИНАХ *GLICINE HISPIDA* ЗАЛЕЖНО ВІД ДОСЛІДЖУВАНИХ ФАКТОРІВ

В. З. Панчишин¹, А. А. Мелешко², Н. І. Корево³, С. В. Можаровський⁴,
І. А. Журавська⁵

У роботі наведені результати дослідження впливу передпосівної інокуляції та протруєння насіння на рослини сої залежно від сорту.

*Для реалізації цієї мети потрібно було вирішити такі завдання: проаналізувати дані літературних джерел щодо активності бактерій роду *Bradyrhizobium* на рослинах сої; проаналізувати сорти сої за ключовими господарськими характеристиками; оцінити сорти сої за показниками врожайності; дослідити вплив протруйників на симбіотичну активність рослин сої; з'ясувати вплив інокулянтів на інтенсивність росту сої.*

Вивчалися сорти сої Ментор та Фаворит, які занесені до Державного реєстру сортів, придатних для вирощування в Україні і рекомендовані для вирощування в зоні Полісся.

*Предпосівну інокуляцію проводили препаратом «РизоСтарт» у нормі 2,5 кг/т насіння, який містить у своєму складі азотфіксуючі бактерії роду *Bradyrhizobium elkanii* (штами U1301 та U1302), що чудово підходить для вирощування сої.*

¹ кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
кафедри ботаніки, біоресурсів та збереження біорізноманіття
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: panch22@ukr.net
ORCID: 0000-0001-5256-5052

² здобувач вищої освіти першого (бакалаврського рівня)
за спеціальністю «Біологія»
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
ORCID: 0009-0008-5846-4699

³ старший викладач кафедри ботаніки, біоресурсів
та збереження біорізноманіття
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: ninakorevo@ukr.net
ORCID: 0000-0002-3744-1382

⁴ викладач вищої категорії, викладач-методист
(Житомирський агротехнічний фаховий коледж, м. Житомир)
e-mail: fsik@i.ua
ORCID: 0000-0001-6703-1424

⁵ кандидат сільськогосподарських наук, викладач спеціальних дисциплін
(Житомирський агротехнічний фаховий коледж, м. Житомир)
e-mail: innazhuravska1@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9332-1134

Протруєння насіння проводили препаратом «Бастіон» у нормі 1,5 л/га. Нами встановлені показники кількості бульбочкових бактерій роду *Bradyrhizobium* на рослинах сої. На контрольних (без проведення інокуляції) ділянках відмічено, що їхня кількість склала 9,0–13,0 шт./рослину у фазу бутонізації (BBCH59). З використанням протруйника Бастіон у фазу бутонізації маса в рослин сорту Фаворит становила 0,31 г/рослину, а в сорті Ментор – 0,44 г/рослину. У фазу цвітіння результати становили 1,01–0,94 г/рослину. Під час проходження фази дозрівання маса бульбочкових бактерій у сорту Фаворит становила 0,84 г/рослину, а для сорту – Ментор 0,80 г/рослину. Кількість бобів на рослині у сорту Фаворит становила 12,3 шт./рослину, а для рослин сорту Ментор – 12,0 шт./рослину на контрольних ділянках. З проведенням протруєння препаратом «Бастіон» та без інокуляції сорти Фаворит і Ментор мали однакову кількість бобів – 11,7 шт./рослину. Кількість насінин для обох сортів становила 25,3 шт./рослину. Маса зерна в сорті Фаворит дорівнювала 1,66, а в сорті Ментор – 1,58 г/рослину.

Ключові слова: соя, зерно, протруєння, бульбочкові бактерії, сорт, інокуляція.

SYMBIOTIC ACTIVITY OF *BRADYRHIZOBIUM* BACTERIA ON *GLICINE HISPIDA* PLANTS DEPENDING ON THE STUDIED FACTORS

V. Z. Panchyshyn, A. A. Meleshko, N. I. Korevo, S. V. Mozharovskyi, I. A. Zhuravska

The article presents the results of the study of the effect of pre-sowing inoculation and seed etching on soybean plants depending on the variety.

*To realize this purpose, the following tasks were solved: to analyze the data of literary sources on the activity of bacteria of the genus *Bradyrhizobium* on soybean plants; analyze soybean varieties by key economic characteristics; evaluate soybean varieties by yield indicators; investigate the effect of rubs on the symbiotic activity of soybean plants; find out the effect of inoculants on the growth rate of soybeans.*

We studied the soybean varieties Mentor and Favorite, which are listed in the State Register of varieties suitable for cultivation in Ukraine and recommended for cultivation in the Polissia zone.

*Pre-seed inoculation was performed with RizoStart at a rate of 2.5 kg/t of seeds, which contains nitrogen-fixing bacteria of the genus *Bradyrhizobium elkanii* (strains U1301 and U1302), which is great for growing soybeans.*

Seed etching was performed with Bastion preparation at a rate of 1.5 l/ha.

*We have established the indicators of the number of nodule bacteria of the genus *Bradyrhizobium* on soybean plants. In control (without inoculation) areas, it was noted that their number was 9.0–13.0 pcs/plant in the budding phase (BBCH59).*

Using Bastion in the budding phase, the mass in Favorit plants was 0.31 g/plant, and in Mentor 0.44 g/plant. In the flowering phase, the results were 1.01–0.94 g/plant. During the maturation phase, the weight of nodule bacteria in the Favorit variety was 0.84 g/plant, and for the Mentor variety 0.80 g/plant.

The number of beans per plant in the Favorit variety was 12.3 pcs/plant, and for the Mentor variety 12.0 pcs/plant in the control areas.

When etching with Bastion and without inoculation, Favorit and Mentor varieties had the same number of beans – 11.7 pcs/plant. The number of seeds for both varieties was 25.3 pcs/plant. The mass of grain in the Favorit variety was 1.66, and in the Mentor variety 1.58 g/plant.

Key words: soybean, grain, etching, nodule bacteria, variety, inoculation.

Вступ

Соя належить до ключових стратегічних сільськогосподарських культур сучасності. Основними світовими виробниками цієї культури є США, Аргентина, Бразилія та Китай, на які припадає 80% глобального виробництва сої. Серед найбільших імпортерів української сої виділяються Туреччина (38%), Іран (20%) та Єгипет (9%). З огляду на високий попит на світовому ринку зер-

нових і експортну привабливість сої виникає потреба в розширенні площ її посівів в Україні (Петриченко, 2016).

Завдяки генетичній мінливості та дедалі більшій ролі біотехнологій і молекулярної селекції врожайність культур продовжує зростати. У майбутньому внесок генетики в підвищення врожайності, ймовірно, стане значно більшим, ніж у минулому. Це пов'язано з тим, що перевага удосконале-

них агротехнічних елементів вирощування культур нівелюється зменшенням родючості (Egli, 2008).

Отже, особливий інтерес зумовлює вивчення сортів сої, оскільки її вирощують на всіх континентах, і вона є найбільш поширеною серед зернобобових культур, відіграючи ключову роль у забезпеченні зернового, харчового та кормового балансів.

Соя є однією з найдавніших культур у світовому землеробстві, батьківщиною якої вважаються Північний Китай, Маньчжурія та Корея. Саме в цих регіонах, на схилах пагорбів і вздовж річкових берегів, зростає її дикий вид – уссурійська соя (Авраменко та ін., 2012).

Першими, хто почав переробляти сою за допомогою ферментної обробки, були китайці, які культивували цю рослину ще з XI століття до н. е. У XX столітті було освоєно промислові методи переробки сої: гідравлічне та шнекове пресування з'явилося у 1930-х роках, метод екстракції, який залишається актуальним і сьогодні, а згодом був розроблений метод екструзії, за якого соєві зерна обробляються у спеціальному екструдері за високих тиску й температури (Shannon et al., 1992).

Швидке зростання обсягів вирощування сої у світі зумовлене високим попитом на цю культуру та продукти її переробки як джерело якісного білка з оптимальним амінокислотним складом. Соєвий білок широко використовується у вигляді протеїнових екстрактів для безпосереднього споживання, зокрема в дитячому харчуванні, виробництві м'ясних і молочних продуктів, безлактозного морозива й інших білкових продуктів. Ці вироби мають лікувальні властивості, позитивно впливають на імунну та серцево-судинну системи. Соя залишається однією з найбільш прибуткових культур, а її економічна вигода від вирощування є беззаперечною (Бабич і Бабич-Побережна, 2010).

В Україні соя є однією з найбільш економічно вигідних культур, проте наразі вона вирощується на обмежених площах – лише 110 тис. га. У перспективі планується поступово збільшити площі її посівів до 0,5–0,9 млн га. За результатами випробувань соя придатна для вирощування у 23 областях України (Петриченко, 2011).

Найбільш сприятливі кліматичні умови для цієї культури характерні для 30% території країни, зокрема Чернігівської, Черкаської, Закарпатської, Вінницької, Кропивницької, Київської, Чернівецької,

Хмельницької та Полтавської областей. Менш придатними є умови на 16% території України, зокрема в Автономній Республіці Крим, Херсонській, Донецькій, Луганській, Запорізькій, Одеській областях, а також у північних районах Чернігівської області, Рівненській, Львівській, Волинській, Житомирській областях і гірських районах Закарпаття та Івано-Франківщини. У цих регіонах середня врожайність сої становить близько 2,5 т/га (Лихочвор та ін., 2008).

Завдяки сучасним досягненням у генетиці, селекції та біотехнології розроблено нові сорти сої, які на родючих ґрунтах, за умови достатньої кількості вологи та поживних речовин, здатні забезпечувати високі врожаї зерна. Найкращі сорти вирізняються високою продуктивністю, стійкістю до шкідників і хвороб, а також адаптивністю до несприятливих абіотичних умов, із потенціалом врожайності 4–6,5 т/га (Черенков і Шевченко, 2017).

Ефективне вирощування сої значною мірою визначається правильним вибором сортів і гібридів цієї культури, адже це є одним із ключових чинників, що сприяє досягненню високої врожайності. При цьому слід враховувати такі критерії: стійкість до несприятливих умов, здатність сорту адаптуватися до різних ґрунтово-кліматичних зон, реалізуючи свій генетичний потенціал, стійкість до хвороб і шкідників, рівень залежності від бур'янів, а також висоту прикріплення нижнього бобу (Fehr, 1999).

Сорти сої класифікуються за тривалістю вегетаційного періоду на кілька груп: ультраранні – до 86 діб, ранньостиглі – 87–105 діб, середньоранньостиглі – 106–126 діб, середньостиглі – 127–135 діб, середньопізньюстиглі – 131–150 діб, пізньюстиглі – 151–160 діб, дуже пізньюстиглі – 161–170 діб та надпізньюстиглі – понад 170 діб. Для оптимізації врожаю господарствам рекомендується висівати одночасно 2–3 сорти з різними строками вегетації (Січкара, 2011).

Більшість існуючих сортів сої виявляють значну чутливість до впливу навколишнього середовища, що призводить до зниження врожайності в умовах дії несприятливих факторів. Тому важливо впроваджувати нові високоурожайні сорти, які мають підвищену стійкість до екстремальних умов і придатні для вирощування за інтенсивними технологіями. Досягнення високих показників виробництва сої можливе завдяки максимальній реалізації продуктив-

ного потенціалу нових сортів у поєднанні з технологією вирощування, адаптованою до конкретної ґрунтово-кліматичної зони. У регіонах, де в липні часто спостерігаються спека й посуха, доцільно вибирати ранньостиглі та посухостійкі сорти для зменшення втрат урожаю (Камінський і Мосьонз, 2010).

Науковці у співпраці з селекціонерами розробили сорти сої з низьким вмістом інгібітора трипсину, завдяки чому їх можна використовувати без попередньої обов'язкової теплової обробки. Основна увага селекційної роботи зосереджена на створенні сортів зі стабільною врожайністю, а також із підвищеним вмістом протеїну та олії в зерні. Одним із ключових параметрів, що значно впливає на зернову продуктивність, яка важко піддається корекції технологіями вирощування, є маса 1000 насінин. Оскільки 74–85% цього показника залежить від генетичних особливостей сорту, важливо впроваджувати у виробництво сою з високими ваговими якостями насіння (Дідора, 2018).

Бульбочкові бактерії, асоційовані з бобовими рослинами, стали першими мікроорганізмами, які почали використовувати для виробництва біодобрив. Їх вибрали через здатність візуально ідентифікувати бактерії та забезпечувати значне накопичення азоту в ґрунті. Наприклад, у сої ці бактерії можуть фіксувати від 70 до 280 кг/га, у горосі – до 40–70 кг/га, а у люцерні на другий рік вирощування – до 200–350 кг/га (Конончук і Піда, 2011).

Встановлено, що до 70 % азоту культура отримує завдяки біологічній фіксації азоту з повітря, яка створюється через симбіоз із бульбочковими бактеріями. Завдяки цьому процесу соя засвоює значну кількість азоту, використовує важкорозчинні мінеральні сполуки, малодоступні для шкідливих культур, і залишає разом із поживними залишками стільки поживних речовин, кількості яких міститься в 15–20 тонах гною (Скоромний, 2010).

Інокуляція – це екологічно безпечна й економічно ефективна технологія азотфіксації, що передбачає обробку насіння препаратами з бульбочковими бактеріями роду *Rhizobium*, які вступають у симбіоз із рослинами. Ця технологія сприяє формуванню симбіотичного апарату, підвищує врожайність і якість продукції, а також знижує пестицидне навантаження на довкілля (Овчарук та ін., 2018).

Соєві бульбочкові бактерії, які проживають на коренях рослин, переважно відсутні в більшості типів ґрунтів. За інокуляції насіння на коренях сої утворюються бульбочки, у яких розвиваються бактерії, що після збирання врожаю залишаються в ґрунті життєздатними протягом 3–5 років. Якщо соя вирощується на полі вперше, для отримання високої врожайності потрібно обробити насіння бульбочковими бактеріями роду *Rhizobium*. Ці бактерії, вступаючи в симбіоз із рослиною, постачають їй фіксований атмосферний азот у формі органічних сполук у потрібній кількості протягом онтогенезу. Це сприяє формуванню стабільних і екологічно безпечних урожаїв (Крамарьов і Артеменко, 2016).

Для кожного виду бобових підбирається спеціалізований штам бактерій, який викликає утворення бульбочок. Зокрема, соя реагує лише на азотфіксуючі бактерії виду *Bradyrhizobium japonicum* (Гуменюк та ін., 2018).

На нових площах вирощування сої рекомендується використовувати гранульовані інокулянти у кількості 5–10 кг/га залежно від способу сівби. У сої гармонійно поєднуються два ключові фізіологічні процеси – фотосинтез і біологічна фіксація азоту. Покращення мінерального живлення сприяє активнішому фотосинтезу в листках, що створює сприятливі умови для біологічної азотфіксації бульбочковими бактеріями. Цей процес, зі свого боку, є основою для синтезу вітамінів, білків, жирів, вуглеводів, амінокислот, ферментів та інших важливих сполук (Мойсієнко і Дідора, 2010).

Ефективне використання біопрепаратів має враховувати екологічні фактори, видовий склад сапротрофних і патогенних мікроорганізмів, ґрунтово-кліматичні умови регіону, а також взаємодію між інтродукованими й аборигенними мікроорганізмами. Ігнорування здатності мікроорганізмів колонізувати кореневу зону рослин, закріплюватися в ній і витіснити патогенну мікробіоту може звести нанівець позитивний вплив біопрепаратів (Колісник та ін., 2013).

Одним із способів вирішення цієї проблеми є застосування бактеріальних препаратів поліфункціональної дії, які мають низку переваг. Вони покращують мінеральне живлення рослин, накопичують біологічний азот у ґрунті, уповільнюють розклад гумусових речовин, сприяють поліпшенню структури ґрунту, зменшують випаровування вологи та масштаби ерозії. Завдяки використанню

природних ефективних штамів бактеріальні препарати забезпечують отримання екологічно чистої продукції, не спричиняючи віддалених генетичних наслідків, як це можуть робити синтетичні хімічні засоби.

Крім того, важливим результатом використання таких препаратів є зниження захворюваності рослин, що дає змогу скоротити застосування пестицидів і покращити екологічну ситуацію в агрофітоценозах (Цюк, 2009).

Матеріал і методи

Дослідження проводилися в лабораторних умовах на базі кафедри ботаніки, біоресурсів та збереження біорізноманіття Житомирського державного університету імені Франка.

Схема досліду: фактор А (сорт) – 1) Ментор; 2) Фаворит; фактор Б (протруєння насіння) – 1) без протруєння насіння (контроль); 2) передпосівне протруєння насіння; фактор В (інокуляція) – 1) без інокуляції; 2) передпосівна інокуляція насіння.

Повторність – триразова.

Для протруєння насіння ми використовували препарат «Бастіон» з нормою внесення 1,5 л/т насіння.

Протруєння проводили вручну, при цьому слідкували, щоб все насіння рівномірно покритися препаратом. Обробку проводили за тиждень до посіву.

Інокуляція насіння сої проводилася препаратом «РизоСтарт». Проводили інокуляцію у нормі 2,5 кг/т у день посіву.

Результати та їх обговорення

Нами встановлені показники кількості бульбочкових бактерій роду *Bradyrhizobium* на рослинах сої. На контрольних (без про-

ведення інокуляції) ділянках відмічено, що їхня кількість становила 9,0–13,0 шт./рослину у фазу бутонізації (ВВСН59) (табл. 1).

На ділянках без протруєння та інокуляції показник становив 9,7–10,3 шт./рослину. Протруєння насіння сої препаратом «Бастіон» збільшило цей показник у середньому на 2,3 шт./рослину в сорті Фаворит та на 3 шт./рослину – в сорті Ментор. Протруєння збільшив кількість бульбочкових бактерій, тому що він є безпечний для цього штаму бактерій, при цьому забезпечив зменшення розвитку інших бактерій.

Безумовно, інокуляція дала найбільший показник кількості бульбочкових бактерій роду *Bradyrhizobium* – 12,0–13,3 шт./рослину. Подібна тенденція відмічена у фазі цвітіння. Встановлено, що кількість бульбочкових бактерій у фазі цвітіння (ВВСН69) збільшилася на 18,3 шт./рослину. Безперечно, у міру проходження наступної фази дозрівання (ВВСН85) симбіотична активність рослин знизилася на 16,7%.

Ми встановили, що у фазу бутонізації (ВВСН59) найбільший вплив мала передпосівна інокуляція препаратом «РизоСтарт» – 38%, дещо менший вплив мав сорт – 33%, частка впливу інших факторів становила 24%, найменший вплив мало протруєння – 5% (рис. 1).

Встановлено, що у фазу цвітіння (ВВСН69) показники збільшилися незначно. Відмічено зниження передпосівної інокуляції – 6%, найбільший вплив – 51% – справили інші фактори, частка впливу фактора А становила 32%, дещо менший вплив було встановлено для фактора Б «протруєння» – 11% (рис. 2).

Таблиця 1

Кількість бульбочкових бактерій роду *Bradyrhizobium* на сої залежно від сорту, протруєння та передпосівної інокуляції насіння, шт./рослину

Сорт (А)	Протруйник (Б)	Інокуляція (В)	Фаза вегетації		
			бутонізація (ВВСН59)	цвітіння (ВВСН69)	дозрівання (ВВСН85)
Фаворит	без протруєння	без інокуляції	9,7	28,0	24,0
		РизоСтарт	12,0	29,3	24,3
	Бастіон	без інокуляції	9,0	29,7	24,7
		РизоСтарт	11,7	30,7	25,3
Ментор	без протруєння	без інокуляції	10,3	26,7	22,7
		РизоСтарт	13,3	27,3	23,0
	Бастіон	без інокуляції	13,0	27,7	23,7
		РизоСтарт	15,3	28,0	24,0
НІР ₀₅ АБВ			1,3	2,1	1,8

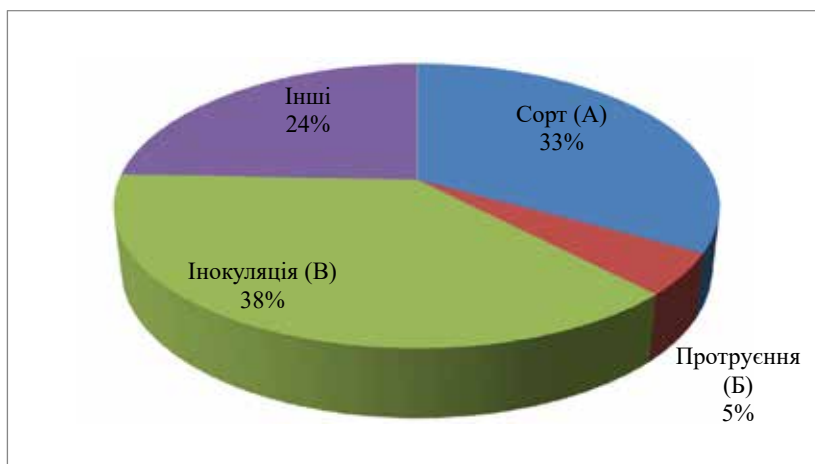


Рис. 1. Частка впливу досліджуваних факторів на кількість бульбочкових бактерій на рослинах сої, фаза бутонізації (BVCH59)

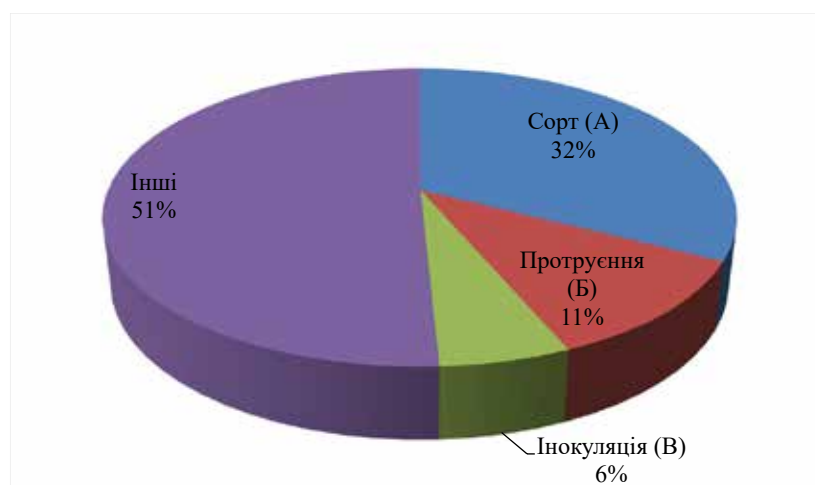


Рис. 2. Частка впливу досліджуваних факторів на кількість бульбочкових бактерій на рослинах сої, фаза цвітіння (BVCH69)

Ми з'ясували, що у фазу дозрівання (BVCH85) симбіотична активність значно знизилась, тож досліджувані фактори фази передпосівної інокуляції не мали, оскільки активність бульбочкових бактерій не була інтенсивною (2,1%), найбільший вплив – 68,4% – становили інші фактори, частка впливу фактора А «сорт» становила 19,1%, дещо менший вплив було встановлено для фактора Б «протруєння» – 10,3% (рис. 3).

За результатами аналізу маси бульбочкових бактерій на рослинах сої у фазу бутонізації (BVCH59) було встановлено, що на контрольних ділянках без проведення протруєння й інокуляції в сорту Фаворит маса становила 0,33 г/рослину, а сорту Ментор – 0,35 г/рослину. На тих же ділян-

ках, але у фазу цвітіння маса бульбочкових бактерій становила 0,95–0,91 г/рослину. Під час проходження наступної фази дозрівання результати обох сортів зменшились. У варіанті без протруєння та з проведенням інокуляції у фазу бутонізації маса бульбочкових бактерій для сорту Фаворит становила 0,41 г/рослину, а для сорту Ментор – 0,45 г/рослину. У фазі цвітіння показники в середньому становили 0,93–1,00 г/рослину. В період дозрівання маса бульбочкових бактерій дорівнювала 0,78–0,83 г/рослину (рис. 4).

Із використанням протруєника «Бастіон» у фазу бутонізації маса рослин сорту Фаворит становила 0,31 г/рослину, а сорту Ментор – 0,44 г/рослину. У фазу цвітіння результати були в межах 1,01–0,94 г/рос-

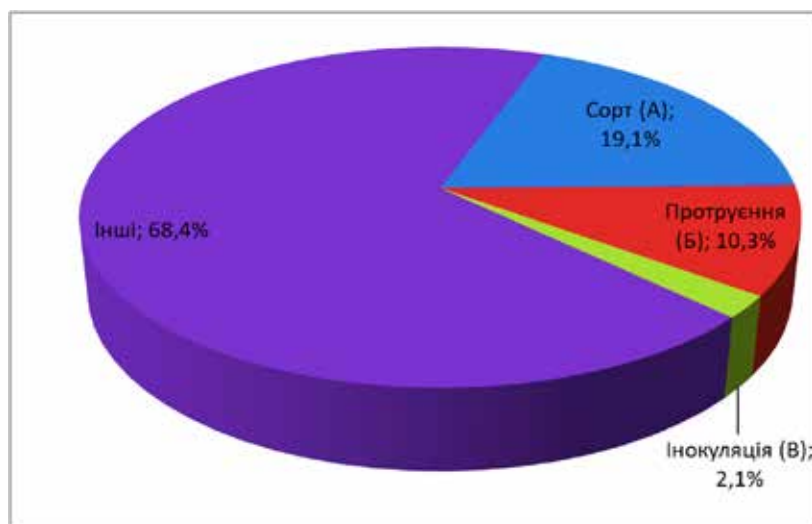


Рис. 3. Частка впливу досліджуваних факторів на кількість бульбочкових бактерій на рослинах сої, фаза дозрівання (BVCH85)

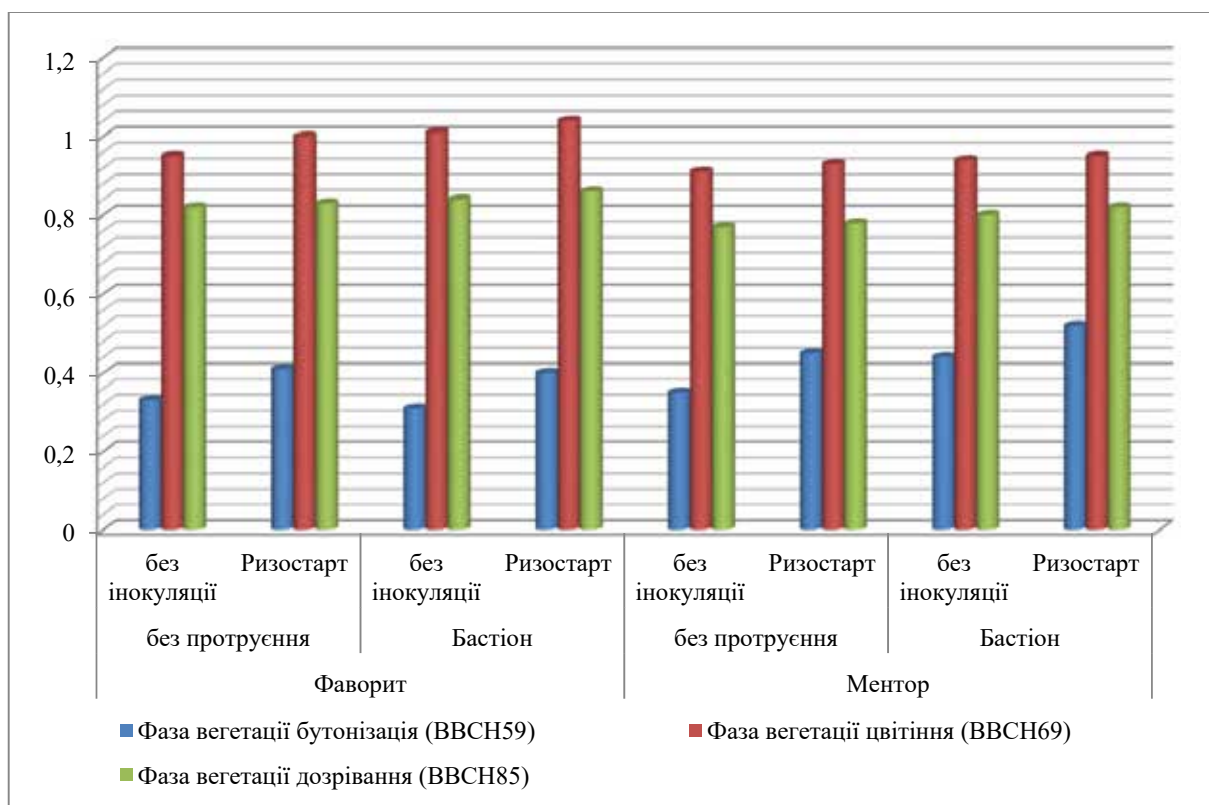


Рис. 4. Маса бульбочкових бактерій на рослинах сої, г/рослину

лину. Під час проходження фази дозрівання маса бульбочкових бактерій у сорті Фаворит становила 0,84 г/рослину, а в сорті Ментор – 0,80 г/рослину.

За використання обох препаратів у фазу бутонізації результати становили 0,40–0,52 г/рослину. В період цвітіння маса була в межах 0,95–1,04 г/рослину.

Під час проходження фази дозрівання маса бульбочкових бактерій сорту Фаворит становила 0,86 г/рослину, а сорту Ментор – 0,82 г/рослину.

За результатами дослідження встановлено індивідуальну продуктивність рослин сої залежно від досліджуваних факторів. Кількість бобів на контрольних ділянках без

Таблиця 2

Індивідуальна продуктивність рослин сої залежно від досліджуваних факторів

Сорт (А)	Протруйник (Б)	Інокуляція (В)	Показник продуктивності		
			к-ть бобів на рослині, шт	к-ть насінин на рослині, шт	маса зерна з рослини, г
Фаворит	без протруєння	без інокуляції	12,3	26,0	1,61
		РизоСтарт	12,0	26,7	1,64
	Бастіон	без інокуляції	11,7	25,3	1,66
		РизоСтарт	11,7	26,0	1,68
Ментор	без протруєння	без інокуляції	12,0	25,7	1,58
		РизоСтарт	12,7	25,3	1,58
	Бастіон	без інокуляції	11,7	25,3	1,58
		РизоСтарт	12,0	25,0	1,60

проведення протруєння й інокуляції для сорту Фаворит становила 12,3 шт./рослину, а для рослин сорту Ментор – 12,0 шт./рослину. Кількість насіння – 26,0–25,7 шт./рослину. Маса зерна в сорті Фаворит становила 1,61 г/рослину, а в сорті Ментор – на 0,03 г/рослину менше (табл. 2).

У варіанті без протруєння та з проведенням інокуляції в середньому показники становили для сорту Фаворит 12,0 шт./рослину, а для сорту Ментор – 12,7 шт./рослину. Сорт Фаворит мав 26,7 шт./рослину, а сорт Ментор – 25,3 шт./рослину. Маса зерна була в межах 1,58–1,64 г/рослину.

У разі проведення протруєння препаратом «Бастіон» та без інокуляції сорти Фаворит і Ментор мали однакову кількість бобів – 11,7 шт./рослину. Кількість насінин для обох сортів становила 25,3 шт./рослину. Маса зерна в сорті Фаворит дорівнювала 1,66 г/рослину, а в сорті Ментор – 1,58 г/рослину.

За використання двох препаратів показники продуктивності сорту Фаворит становили 11,7 – кількість бобів на рослині, а сорту Ментор – 12,0 шт./рослину. Кількість насінин на рослині для сорту Фаворит становила 26,0 шт./рослину, а для сорту Ментор – 25,0 шт./рослину. Маса зерна

в сорті Фаворит дорівнювала 1,68 г/рослину, а в сорті Ментор – 1,60 г/рослину.

Висновки

Встановлено показники кількості бульбочкових бактерій роду *Bradyrhizobium* на рослинах сої. На контрольних (без проведення інокуляції) ділянках відмічено, що їхня кількість становила 9,0–13,0 шт./рослину у фазу бутонізації (BVCH59).

Виявлено, що з використанням протруйника «Бастіон» у фазу бутонізації маса рослин сорту Фаворит становила 0,31 г/рослину, а сорту Ментор – 0,44 г/рослину. Результати у фазу цвітіння – 1,01–0,94 г/рослину. Під час проходження фази дозрівання маса бульбочкових бактерій у рослин сорту Фаворит дорівнювала 0,84 г/рослину, а сорту Ментор – 0,80 г/рослину.

Кількість бобів на рослині у сорту Фаворит – 12,3 шт./рослину, а сорту Ментор – 12,0 шт./рослину на контрольних ділянках.

У разі проведення протруєння препаратом «Бастіон» та без інокуляції сорти Фаворит і Ментор мали однакову кількість бобів – 11,7 шт./рослину. Кількість насінин для обох сортів становила 25,3 шт./рослину. Маса зерна в сорті Фаворит – 1,66, а в сорті Ментор – 1,58 г/рослині.

Список використаної літератури

- Авраменко С., Зуза В., Цехмейструк М. Боремося і перемагаємо бур'яни. *Агробізнес*. 2012. № 11 (234). С. 25–29.
- Бабиц А.О., Бабиц-Побережна А.А. Соевий пояс і розміщення виробництва сої в Україні. *Пропозиція*. 2010. № 4. С. 52–56.
- Гуменюк І. І., Грузинський С. Ю., Бровко І. С., Чабанюк Я. В. Коренева система сої за дії *Bradyrhizobium japonicum*. *Агроекологічний журнал*. 2018. № 1. С. 138–143.
- Дідора В.Г. Агроекологічне обґрунтування продуктивності сої залежно від елементів технології вирощування в умовах Полісся України. *Інноваційні технології у рослинництві: про-*

блеми та їх вирішення : матеріали Міжнародної наук.-практ. конф. (м. Житомир, 7–8 червня 2018 р.). Житомир : вид-во «Рута». 2018. С. 36–41.

Камінський В.Ф., Мосьонз Н.П. Вплив елементів технології вирощування на урожайність сої в умовах північного Лісостепу України. *Корми і кормовиробництво*. 2010. № 66. С. 91–95.

Колісник С.І., Кобак С.Я., Сереветник О.В. Вплив прийомів сортової технології на формування симбіотичної та насінневої продуктивності сої в умовах Лісостепу України. *Корми і кормовиробництво*. 2013. № 76. С. 139–145.

Конончук О., Пида С. Вирощування сої. Роль інновацій у підвищенні наявного потенціалу країни : матеріали міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., м. Тернопіль, 14–15 грудня 2011 р. Тернопіль : Крок, 2011. С. 65–67.

Крамарьов С.М., Артеменко С.Ф. Вплив інокуляції насіння сої бактеріальними препаратами на продуктивність її агроценозів в умовах північної частини Степової зони України. *Вісник Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету*. 2016. № 4 (42). С. 72–75.

Лихочвор В.В., Петриченко В.Ф., Івашук П.В. Зерновиробництво. Львів : Українські технології, 2008. 624 с.

Мойсієнко В.В., Дідора В.Г. Агроекономічне обґрунтування ролі сої у вирішенні проблеми рослинного білка в Україні. *Вісник ЖНАЕУ*. 2010. № 1. С. 1–14.

Овчарук О.В., Овчарук О.В., Хоміна В.Я., Каленська С.М. Агроекологічні особливості вирощування сої. *Інноваційні технології в рослинництві : матеріали наукової інтернет конференції*, 15 травня 2018 р. С. 134–136.

Петриченко В.Ф. Виробництво зернових культур і сої в Україні. *Сучасні виклики та перспективи*. Зернобобові культури та соя для сталого розвитку аграрного виробництва України : зб. тез доп. Міжнар. наук. конф. Вінниця, 2016. С. 10–11.

Петриченко В.Ф. Наукові основи сталого соєсіяння в Україні. *Корми і кормовиробництво*. 2011. № 69. С. 3–10.

Січкарь В.І. Генетичні основи покращання якості насіння сої. *Соя: селекція, виробництво і використання для розв'язання глобальної продовольчої проблеми* : зб. тез доп. наук.-практ. конф. Вінниця (8–9 серпня), 2011. С. 6–7.

Скоромний С. Різноманітність сої в степах України. *Агроперспектива*. 2010. № 4. С. 78–79.

Цюк О.А. Ефективність елементів органічного землеробства в Лісостепу : збірник наукових праць Національного наукового центру «Інститут землеробства УААН». Київ, 2009. № 3. С. 25–32.

Черенков А.В., Шевченко М.С. Стратегія виробництва зернобобових культур і сої в Степу України. *Вісник аграрної науки*. 2017. Том 95. № 1. С. 13–18. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201701-02>.

Egli D.B. Comparison of corn and soybean yields in the United States: Historical trends and future prospects. *Agronomy Journal*. 2008. Vol. 100. P. 79–88. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0286c>.

Fehr W.R. The importance and future prospects for genetic diversity for yield improvement. *Proceedings of the 6th World Soybean Research Conference*. Urbana-Champaign, IL, USA, 1999. P. 186–187.

Shannon D.A., Kueneman E.A., Wright M.J., Wood C.W. Fertilization effect of soybean grown and yield in the southern Guinea savanna of Nigeria. *J. Plant Nutr.* 1992. № 15 (5). P. 639–658.

References

Avramenko, S., Zuza, V., & Tsekhmeistruk, M. (2012). Boremosia i peremahaiemo buriany [We fight and defeat weeds]. *Ahrobiznes [Agrobusiness]*, 11 (234), 25–29 [in Ukrainian].

Babych, A.O., & Babych-Poberezhna, A.A. (2010). Soieviy poias i rozmishchennia vyrobnytstva soi v Ukraini [Soybean belt and location of soybean production in Ukraine]. *Propozytsiia [Offer]*, 4, 52–56 [in Ukrainian].

Humeniuk, I.I., Hruzynskyi, C.Ju., Brovko, I.S., & Chabaniuk, Ja.V. (2018). Koreneva systema soi za dii Bradyrhizobium japonicum [Soybean root system under the influence of Bradyrhizobium japonicum]. *Ahroekolohichniy zhurnal [Agroecological Journal]*, 1, 138–143 [in Ukrainian].

Didora, V.Gh. (2018). Ahroekolohichne obgruntuvannia produktyvnosti soi zalezno vid elementiv tekhnolohii vyroshchuvannia v umovakh Polissia Ukrainy [Agroecological substantiation of soybean productivity depending on elements of cultivation technology in the conditions of Polissya Ukraine]. *Innovatsiini tekhnolohii u roslinnytstvi: problemy ta yikh vyrishennia : materialy Mizhnarodnoi nauk.-*

prakt. konf. [Innovative technologies in crop production: problems and their solutions: materials of the International Scientific-Practical Conference], 36–41 [in Ukrainian].

Kaminskyi, V.F., & Mosonz, N.P. (2010). Vplyv elementiv tekhnolohii vyroshchuvannya na urozhainist soi v umovakh pivnichnoho Lisostepu Ukrainy [The influence of elements of growing technology on soybean yield in the conditions of the northern forest-steppe of Ukraine]. *Kormy i kormovyrobnytstvo [Feed and feed production]*, 66, 91–95 [in Ukrainian].

Kolisnyk, S.I., Kobak, S. Ya., & Serevetnyk, O.V. (2013). Vplyv pryimiv sortovoi tekhnolohii na formuvannya symbiotychnoi ta nasinnievoi produktyvnosti soi v umovakh Lisostepu Ukrainy [The influence of varietal technology techniques on the formation of symbiotic and seed productivity of soybeans in the conditions of the Forest-Steppe of Ukraine]. *Kormy i kormovyrobnytstvo [Feed and feed production]*, 76, 139–145 [in Ukrainian].

Kononchuk, O., & Pyda, S. (2011). Vyroshchuvannya soi [Soybean cultivation]. *Rol innovatsii u pidvyshchenni naiavnoho potentsialu krainy: materialy mizhnar. nauk.-prakt. internet-konf. [The role of innovations in increasing the country's existing potential: materials of the international scientific-practical online conference]*, 65–67 [in Ukrainian].

Kramarov, S.M., & Artemenko, S.F. (2016). Vplyv inokuliatsii nasinnia soi bakterialnymy preparatamy na produktyvnist yii ahrotsenoziv v umovakh pivnichnoi chastyny Stepovoi zony Ukrainy [The influence of inoculation of soybean seeds with bacterial preparations on the productivity of its agrocenoses in the conditions of the northern part of the Steppe zone of Ukraine]. *Visnyk Dnipropetrovskoho derzhavnogo aharno-ekonomichnoho universytetu [Bulletin of the Dnipropetrovsk State Agrarian and Economic University]*, 4 (42), 72–75 [in Ukrainian].

Lykhochvor, V.V., Petrychenko, V.F., & Ivashchuk P.V. (2008). Zernovyrobnytstvo [Grain Production]. *Ukrainski tekhnolohii [Ukrainian Technologies]* [in Ukrainian].

Moisiienko, V.V., & Didora, V.H. (2010). Ahroekonomichne obgruntuvannya roli soi u vyrishenni problemy rosllynnoho bilka v Ukraini [Agroeconomic justification of the role of soybean in solving the problem of vegetable protein in Ukraine]. *Visnyk ZhNAEU [Bulletin of the Ukrainian Agricultural University]*, 1, 1–14 [in Ukrainian].

Ovcharuk, O.V., Ovcharuk, O.V., Khomina, V.Ya., & Kalenska S.M. (2018). Ahroekolohichni osoblyvosti vyroshchuvannya soi [Agroecological features of soybean cultivation]. *Innovatsiini tekhnolohii v rosllynnytstvi: materialy naukovoï internet konferentsii [Innovative technologies in crop production: proceedings of the scientific internet conference]*, 134–136 [in Ukrainian].

Petrychenko, V.F. (2016). Vyrobnnytstvo zernovykh kultur i soi v Ukraini. Suchasni vyklyky ta perspektyvy [Production of grain crops and soybeans in Ukraine: Current challenges and prospects.]. *Zernobobovi kultury ta soia dlia staloho rozvytku aharnoho vyrobnytstva Ukrainy : zb. tez dop. Mizhnar. nauk. konf. [Grain legumes and soybeans for the sustainable development of agricultural production in Ukraine: collection of abstracts of the International Scientific Conference]*, 10–11 [in Ukrainian].

Petrychenko, V.F. (2011). Naukovi osnovy staloho soiesiiannia v Ukraini [Scientific foundations of sustainable co-sowing in Ukraine]. *Kormy i kormovyrobnytstvo [Feed and feed production]*, 69, 3–10 [in Ukrainian].

Sichkar, V.I. (2011). Henetychni osnovy pokrashchannia yakosti nasinnia soi [Genetic basis of improving the quality of soybean seeds]. *Soia: selektsiia, vyrobnytstvo i vykorystannia dlia rozviazannia hlobalnoi prodovolchoi problemy: zb. tez dop. nauk.-prakt. konf. [Soybean: breeding, production and use for solving the global food problem: collection of abstracts of the additional scientific-practical conference]*, 6–7 [in Ukrainian].

Skoromnyi, S. (2010). Riznoiakisnist soi v stepakh Ukrainy [Soybean quality diversity in the steppes of Ukraine]. *Ahroperspektyva [Agroperspective]*, 4, 78–79 [in Ukrainian].

Tsiuk, O.A. (2009). Efektyvnist elementiv orhanichnoho zemlerobstva v Lisostepu [The effectiveness of elements of organic farming in the Forest-Steppe]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho naukovoho tsentru "Instytut zemlerobstva UAAN" [Collection of scientific works of the National Scientific Center "Institute of Agriculture of the Ukrainian Academy of Sciences"]*, 3, 25–32 [in Ukrainian].

Cherenkov, A.V., & Shevchenko, M.S. (2017). Stratehiia vyrobnytstva zernobobovykh kultur i soi v Stepu Ukrainy [Strategy for the production of legumes and soybeans in the Steppe of Ukraine]. *Visnyk aharnoï nauky [Bulletin of Agrarian Science]*, Vol. 95, 1, 13–18. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201701-02> [in Ukrainian].

Egli, D.B. (2008). Comparison of corn and soybean yields in the United States: Historical trends and future prospects. *Agronomy Journal*, 100, 79–88. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0286c> [in English].

Fehr, W.R. (1999). The importance and future prospects for genetic diversity for yield improvement. *Proceedings of the 6th World Soybean Research Conference*, Urbana-Champaign, IL, USA, 86–187 [in English].

Shannon, D.A., Kueneman, E.A., Wright, M.J., & Wood, C.W. (1992). Fertilization effect of soybean grown and yield in the southern Guinea savanna of Nigeria. *J. Plant Nutr*, 5, 639–658 [in English].

Отримано: 16.04.2025

Прийнято: 15.05.2025



Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 12
Український журнал природничих наук
№ 12

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

УДК 633.34:631.53:631.55

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.21>

ВПЛИВ РІВНЯ ВОЛОГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ І ПЛОЩІ ЖИВЛЕННЯ НА СТРУКТУРУ ВРОЖАЮ СОЇ ТА ЇХ ЗНАЧЕННЯ ДЛЯ НАСІННИЦТВА

О. В. Пилипенко¹

Реалізація потенціалу продуктивності кожного сорту є процесом, що безпосередньо пов'язаний із його адаптивними характеристиками, як-от пластичність і стабільність. Ці важливі властивості включають показники, серед яких чільне місце належить урожайності, масі тисячі насінин і фракційному складу насіння, структурним елементам урожаю та якості насіння. Сорти, які демонструють низьку адаптивність або зменшену пластичність, зазвичай піддаються значним коливанням вищезгаданих показників із року в рік. На сучасному етапі розвитку технологій у сільському господарстві, особливо у вирощуванні сої, значення сорту та його сортової технології дедалі більше зростають, особливо у сфері насінництва. Це зумовлено необхідністю оптимізації агротехнічних підходів для досягнення максимальної ефективності та стійкості виробничих процесів. У статті викладено результати досліджень щодо вивчення впливу рівня вологозабезпечення і площі живлення на структуру врожаю сортів сої та значення їх для насінництва в посушливих умовах Лісостепу України.

Польові дослідження проводилися у 2022–2024 роках на території фермерського господарства «Грига» (згідно з договором), розташованого в Полтавському районі Полтавської області. Ґрунт цього району характеризується як типовий чорнозем із невеликим умістом гумусу, а попередник – озима пшениця. У рамках дослідження було оцінено 12 сортів сої, які створені провідними селекційними установами України. До них належать Авантюрин, Адамос, Алмаз, Александрит, Антрацит, Аквармарин, Арніка, Голубка, Златослава, Муза, Сіверка та Самородок. Лабораторні та польові експерименти показали значну варіативність реакції сортів на зміну площі живлення та вологозабезпечення. Окрім того, у процесі досліджень був виявлений варіант низької показників, як-от: висота рослини, висота закріплення нижнього бобу, кількість бобів, кількість насіння з рослини, кількість вузлів на головному стеблі, гілкування та продуктивність кожного окремого сорту. Аналіз широкого спектра сортів сої та впливу площі живлення на їхню продуктивність проводили за допомогою модельних дослідів. Завдяки структурному аналізу рослин сортів сої вдалося досконало оцінити низку показників.

Ключові слова: соя, сорти, насінництво, структура врожаю, маса 1 000 насінин, площа живлення, погодні умови.

¹ здобувач ступеня вищої освіти доктора філософії
кафедри селекції, насінництва і генетики
(Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава)
e-mail: psov@ukr.net
ORCID: 0009-0002-7540-4504

INFLUENCE OF THE LEVEL OF MOISTURE SUPPLY AND FEEDING AREA ON THE STRUCTURE OF SOYBEAN YIELD AND THEIR IMPORTANCE FOR SEED PRODUCTION

O. V. Pylypenko

Realising the productivity potential of each variety is a process that is directly related to its adaptive characteristics, such as plasticity and stability. These important properties include indicators such as yield, thousand-seed weight and seed fraction composition, crop structural elements and seed quality.

Varieties that demonstrate low adaptability or reduced plasticity are usually subject to significant fluctuations in the above-mentioned parameters from year to year. At the current stage of technology development in agriculture, especially in soybean cultivation, the importance of the variety and its varietal technology is becoming increasingly important, especially in the field of seed production. This is due to the need to optimise agronomic approaches to achieve maximum efficiency and sustainability of production processes. The article presents the results of research on the influence of moisture supply and nutrition area on the yield structure of soybean varieties and their importance for seed production in the arid conditions of the Forest-Steppe of Ukraine.

The field studies were conducted in 2022–2024 on the territory of the farm 'Gryga' (according to the contract), located in Poltava district of Poltava region. The soil in the area is characterised as typical black soil with low humus content, and the previous crop was winter wheat. The study evaluated 12 soybean varieties developed by leading Ukrainian breeding institutions. These include Avanturin, Adamos, Almaz, Alexandrite, Anthracite, Aquamarine, Arnika, Golubka, Zlatoslava, Muza, Siverka and Samorodok. Laboratory and field experiments have shown significant variability in the response of varieties to changes in the area of nutrition and moisture supply. In addition, the research revealed variations in a number of parameters: plant height, lower bean height, number of beans, number of seeds per plant, number of nodes on the main stem, branching and productivity of each individual variety. The analysis of a wide range of soybean varieties and the impact of feeding area on their productivity was carried out using model experiments. Thanks to the structural analysis of soybean plants, a number of indicators were perfectly evaluated.

Key words: soybeans, varieties, seed production, crop structure, weight of 1 000 seeds, feeding area, weather conditions.

Вступ

Соя є однією із ключових культур агро-сектору, оскільки слугує важливим джерелом рослинного білка, що за складом наближений до білка тваринного походження. Однак, попри розширення площ під її вирощування, в Україні врожайність сої залишається нестабільною і не досить високою. Щоб збільшити обсяги виробництва сої та налагодити повноцінну схему насінництва для забезпечення потреб товарного виробництва, першочергово необхідно розробити та запровадити у виробництво високоврожайні та якісні сорти, адаптовані до конкретних умов вирощування (Кириченко та ін., 2016; Соя ..., 2023).

Правильний вибір технологій і сортів допомагає знизити ризики під час вирощування сої. Зміна термінів сівби й густоти посіву дає можливість регулювати забезпечення рослин теплом і вологою в умовах змін клімату. Сорт є одним із найбільш доступних агрозаходів для зменшення негативного впливу обмежувальних чинників зовнішнього середовища на врожайність

сільськогосподарських культур і значною мірою забезпечує їхню адаптивність до конкретних умов вирощування (Кириченко та ін., 2016; Білявська і Рибальченко, 2019).

Урожайність сої, відсотковий вихід насіння та його фракційність є складними показниками, що відображають ефективність усіх елементів структури та чинників, які впливають на культуру під час вегетації. Продуктивність сортів сої значно залежить від забезпечення необхідними чинниками життєдіяльності, адже вони впливають на зміну ключових елементів структури врожаю. Зокрема, це маса 1 000 насінин, кількість насінин у кожному бобі, кількість бобів на рослині, маса насіння з однієї рослини, рівномірність розподілу бобів по рослині та висота розміщення нижнього бобу. Оптимальне забезпечення гідротермічних і агротехнічних умов дозволяє сформувати високу індивідуальну продуктивність рослин сої (Рябуха та ін., 2019; Шовкова, 2020; Пилипенко та ін., 2022; Ревтьо і Золін, 2023).

Згідно з багатьма дослідженнями, правильно підібраний сорт, якість, оптимальні

норми посіву, а також своєчасний і якісний догляд за соєвими посівами значно впливають на врожайність. Ці фактори можуть суттєво змінювати кількість та якість насіння, масу 1 000 зерен тощо. Для сортів різних видів (інтенсивні або екстенсивні) наявні різні вимоги, які можуть впливати на врожайність та якість насіння за несприятливих ґрунтово-кліматичних умов (Рябуха та ін., 2019; Кириченко та ін., 2016; Ходаніцька та ін., 2024).

Кліматичні зміни є серйозною загрозою для нашої планети, суттєво впливають на сільськогосподарське виробництво. Зміна гідротермічних умов, що особливо помітна в Лісостеповій і Степовій зонах нашої країни протягом останніх десятиліть через загальне потепління, призводить до нестабільності у виробництві сільськогосподарської продукції, зокрема насіння сої. Наукові дослідження свідчать про недостатню адаптацію існуючих сортів сої, що потребує тривалої та цілеспрямованої селекційної роботи для їх покращення (Білявська і Пилипенко, 2016; Рябуха та ін., 2019; Цицюра та ін., 2021).

Відповідно до норми висіву відбуваються зміни в індивідуальній продуктивності сої, що охоплює такі параметри, як кількість і маса бобів та насіння, а також висота прикріплення нижніх бобів. З дотриманням оптимальної густоти рослин більша частина бобів і насіння формується на головному стеблі. Для кожного сорту, в умовах конкретних ґрунтово-кліматичних характеристик, установлюється оптимальна густота рослин, яка забезпечує найбільш ефективну фотосинтетичну та симбіотичну активність, сприяє тим самим формуванню високоякісного врожаю насіння (Рябуха, 2019).

Розширення посівних площ під соєю в умовах нестабільного зволоження Лісостепу нині є непростим завданням. Основною причиною цього стають обмеження через відсутність добре адаптованих регіональних технологій обробітку й агротехнічних практик, які відповідають умовам місцевості та клімату й сортів відповідно (Цицюра та ін., 2019; Соє ..., 2023).

Матеріал і методи

Мета досліджень – проаналізувати та простежити вплив засушливих погодних умов (вологозабезпечення) і площі живлення на формування структури врожаю для різних сортів сої. Основна тема роботи охоплює такі чинники, як погодні умови та площа живлення, які впливають на врожайність насіння та елементи структури врожаю сор-

тів Української сої селекції різних наукових установ. Серед сортів, що оцінюються, такі: Авантюрин, Адамос, Алмаз, Александрит, Антрацит, Аквамарин, Арніка, Голубка, Златослава, Муза, Сіверка, Самородок.

Протягом 2022–2024 рр. на території фермерського господарства «Грига» у Полтавському районі Полтавської області провели польові дослідження. Ґрунт – типовий малогумусний чорнозем, із вмістом гумусу на рівні 4,58%, Попередник – озима пшениця. За агрохімічною шкалою ґрунт оцінено на 58,67 бала. Для вирощування використовували загальноприйняті методи, актуальні для посушливої зони Лісостепу України, але з коригуванням густоти посіву та площі живлення. Висівали згідно з модельним дослідом, щоб дослідити вплив площі живлення на врожайність. Після збору попередника провели дискування на глибині 12 см й оранку на 28 см. Шлейфування та передпосівну культивування виконали на глибину 5–6 см, Глибина посіву – приблизно 4 см. Щодо удобрення, восени внесли комплекс NPS 12:24:12+6Ca у кількості 100 кг, а навесні під час культивування застосували добриво NPK 16:16:16+6S у кількості 180 кг. Для захисту рослин використовували засоби захисту рослин, як-от Примекстра TZ Голд, 4,5 л/га; Класік Форте, 30 г/га; Фюзілад Форте, 1,5 л/га, у поєднанні з Коннектом, 0,5 л/га; Амістар Екстра, 0,75 л/га.

Для аналізу погодних умов під час проведення досліджень у господарстві «Грига» були використані дані із власної метеостанції моделі “Davis 6152 Vantage Pro 2”, яка розташована неподалік поля досліджень. Кліматичні умови в роки проведення експериментів суттєво різнилися. Для комплексного визначення рівня зволоженості регіону було застосовано розрахунок гідротермічного коефіцієнта (далі – ГТК) за такою формулою:

$$\text{ГТК} = r / (0,1 * \sum t > 10^{\circ}\text{C}),$$

де r – сума опадів за період, мм; $\sum t > 10^{\circ}\text{C}$ – сума активних температур за той самий період, $^{\circ}\text{C}$.

У дослідженні застосовувався метод посіву сої, відомий як променевий спосіб, розроблений Дж. Недлером, В. Дунканом і Д. Еглі в 1980-х рр. у США. У 1990-х рр. науковці Інституту кормів та сільського господарства Поділля Національної академії аграрних наук України створили модифіковану версію системної моделі (Egli, 1988; Шевніков і Логвиненко, 2012; Carciocchi et

al., 2019). Під час модельних експериментів вони забезпечували умови, за яких площа живлення кожної рослини поступово збільшувалася зі збільшенням відстані від центра кола. Цей модельний підхід неодноразово використовувався для польових досліджень на різних сортах сої в лабораторії селекції та насінництва сої Полтавського державного аграрного університету. Разом із фахівцями лабораторії мною були внесені деякі зміни до організації проведення дослідження та тлумачення отриманих результатів.

Щоб зменшити негативний вплив, який може виникати між сусідніми рослинами сої, що ростуть у напрямку променів, які розходяться від центра кола, а також для забезпечення рівних умов вирощування за різних варіантів досліджень і підвищення точності отриманих результатів, було запропоновано створити додаткове коло всередині великого кола. У моїх дослідженнях радіус цього внутрішнього кола був визначений як 12 сантиметрів. Візуально цей експериментальний дизайн можна уявити як коло, з якого виходять 32 промені або радіуси. Довжина кожного променя – 3 метри, відстань між рослинами може змінюватися залежно від конкретних цілей дослідження. На основі експериментів, проведених у період 2022–2024 рр., відстань між рослинами на кожному промені була встановлена на рівні 8 см.

Аналіз отриманих результатів проведено за допомогою програми для роботи з електронними таблицями й інструменту для візуалізації і аналізу даних “Microsoft Excel” для Microsoft 365 (ліцензійна версія).

Результати та обговорення

Дослідження, проведене з метою оцінювання впливу вологозабезпечення (у

посушливих умовах) і площі живлення на структуру врожаю сортів сої, продемонструвало, що результати значною мірою залежать як від змін площі живлення, так і від специфічних кліматичних умов кожного року. Під час вегетаційного періоду спостерігалася нерівномірність розподілу опадів. Особливо посушливим виявився 2024 р., коли кількість опадів за травень – вересень становила лише 89,3 мм, що є вчетверо меншим порівняно із середніми багаторічними показниками для цього періоду. Температурний режим і кількість опадів за вегетаційний період подано в таблицях 1 і 2.

На ілюстрації на рис. 2 докладно продемонстровано показники ГТК. Зволоження територій за цими показниками можна розділити на кілька зон, які класифікуються так: надлишково вологі (більше $-1,6$), вологі ($1,3-1,6$), слабо посушливі (менше за $1,0-1,3$), посушливі (менше ніж $0,7-1,0$), дуже посушливі ($0,4-0,7$) та сухі (менше за $0,4$). На (див. рис. 2) подекадно зображено показники ГТК за всі роки досліджень, що дозволяє відстежити вплив температури повітря та кількості опадів на процеси росту й загальний розвиток сортів сої протягом досліджуваних років, а також зміну цих показників із року в рік.

Погодні умови, що спостерігалися протягом 2024 р., які характеризувалися переважно високими температурами та тривалою відсутністю опадів у ключовий період наливу та формування насіння сортів сої, виявили значний вплив на зниження загальної врожайності й інших показників, що характеризують структурну продуктивність. Такі показники, як маса 1 000 насінин і загальна кількість насіння, зазнали сутте-

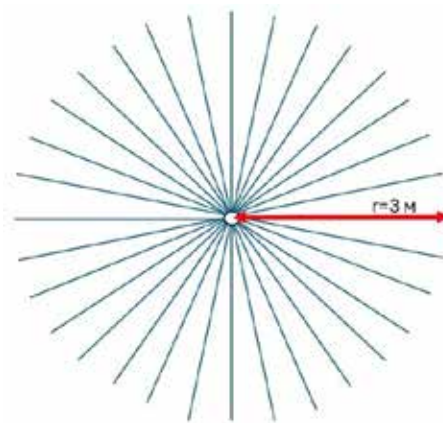


Рис. 1. Схема модельного дослідження та вигляд під час вегетації

Таблиця 1

Хід середньої температури під час проведення досліджень

Температура, °С		2022 р.	2023 р.	2024 р.
Декада/місяць				
Травень	1 декада	12,1	11,7	13,3
	2 декада	14,9	17,5	12,8
	3 декада	16,1	18,1	20,0
Червень	1 декада	20,8	18,9	22,4
	2 декада	21,5	19,7	22,0
	3 декада	20,8	20,1	21,8
Липень	1 декада	23,4	23,4	26,6
	2 декада	19,1	20,2	28,3
	3 декада	20,3	21,4	23,2
Серпень	1 декада	22,3	23,5	22,3
	2 декада	23,4	22,5	22,1
	3 декада	23,0	22,1	26,9
Вересень	1 декада	12,8	17,3	22,1
	2 декада	13,8	15,8	21,3
	3 декада	12,3	18,0	18,3

Таблиця 2

Кількість опадів за вегетаційний період під час проведення досліджень

Опади, мм		2022 р.	2023 р.	2024 р.
Декада/місяць				
Травень	1 декада	1,0	1,0	5,8
	2 декада	2,4	0,8	5,6
	3 декада	23,0	71,1	2,2
Червень	1 декада	19,6	2,0	5,8
	2 декада	15,0	14,4	55,8
	3 декада	68,0	59,6	9,3
Липень	1 декада	1,4	10,2	0,0
	2 декада	32,2	25,6	0,0
	3 декада	21,6	30,8	2,0
Серпень	1 декада	68,0	43,2	0,4
	2 декада	24,8	77,4	0,0
	3 декада	3,4	0,4	0,6
Вересень	1 декада	4,0	10,2	0,0
	2 декада	61,0	38,2	1,8
	3 декада	39,6	0,0	0,0

вих змін порівняно з попередніми роками досліджень. Особливо помітно це було тоді, коли посіви були надзвичайно загущені, оскільки мала площа живлення призводила до більш інтенсивної конкуренції між рослинами. На основі моделювання експерименту було встановлено, що густота посіву для кожного сорту сої варіювала в межах від 207 469 до 1 612 903 рослин на гектар. Відповідно, площа живлення для однієї рослини становила від 0,0482 до 0,0062 м²

(таблиця 3). Ця гама густоти посіву моделює фактично всі можливі варіанти густоти, які можуть застосовуватися як із виробничими, так і з науковими цілями. Разом це дозволяє отримати всебічне розуміння поведінки різноманітних сортів сої в умовах різних агрокліматичних умов.

Було встановлено, що різні сорти сої в умовах модельного досліду мали варіативні показники врожайності насіння та структури врожаю, які залежали від густоти

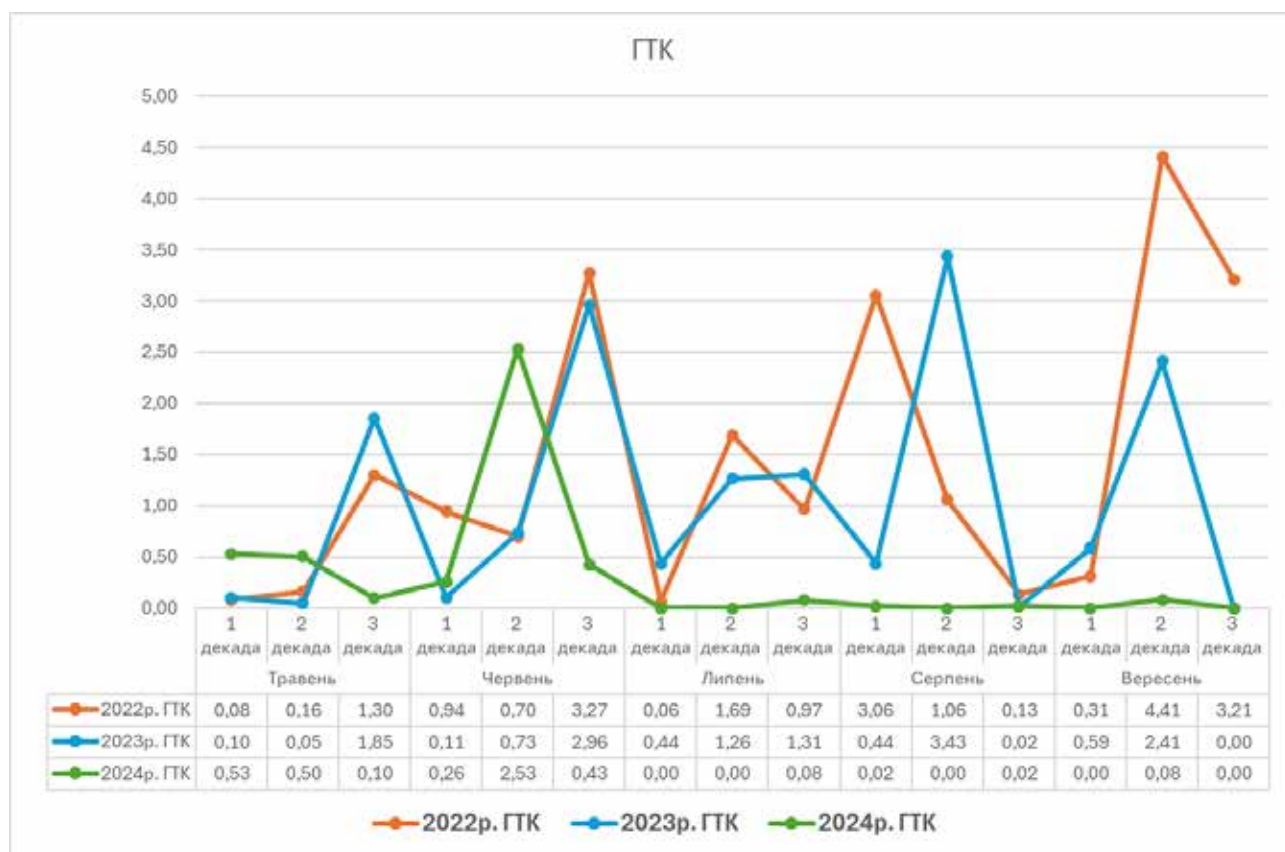


Рис. 2. Динаміка гідротермічного коефіцієнта за вегетаційний період сої (2022–2024 рр.)

Таблиця 3
Площа живлення та густина стояння рослин
у модельному досліді

Варіант досліді	Густина стояння рослин, шт./га	Площа живлення, м ²
1	207 469	0,0482
2	212 766	0,0470
3	218 341	0,0458
...	...	...
8	251 256	0,0398
9	259 067	0,0386
10	267 380	0,0374
...	...	...
25	515 464	0,0194
26	549 451	0,0182
27	588 235	0,0170
...	...	...
34	1 162 791	0,0086
35	1 351 351	0,0074
36	1 612 903	0,0062

посіву. В аналізі врожайності, з урахуванням погодних умов року та площі живлення рослин, виявлено різну чутливість сортів до цих чинників.

Маса тисячі насінин є важливим показником, який водночас має генетичну детермінацію та залежить від біологічних характеристик сортів. Однак він також значною мірою залежить від умов вирощування сої. Тому суттєві зміни цієї ознаки відбуваються під впливом різних агротехнологій. На рис. 3 продемонстровано вплив площі живлення та погодних умов на формування маси 1 000 насінин у деяких сортів сої.

У результаті проведеного аналізу в низки сортів сої виявилися значні коливання маси 1 000 насінин залежно від умов року. Усі сорти в разі загущення (зменшення площі живлення) мали зменшення даного показника. Істотний вплив мали погодні умови, особливо відсутність вологи у критичні для рослини періоди. Зміна маси 1 000 насінин залежно від площі живлення та погодних умов у досліді становила до 25%.

Маса насіння, отриманого з рослини, є ключовим показником, що визначає продуктивність окремих рослин. Лише шляхом множення цієї величини на густоту посівів можна оцінити загальну врожайність. Тому надзвичайно важ-

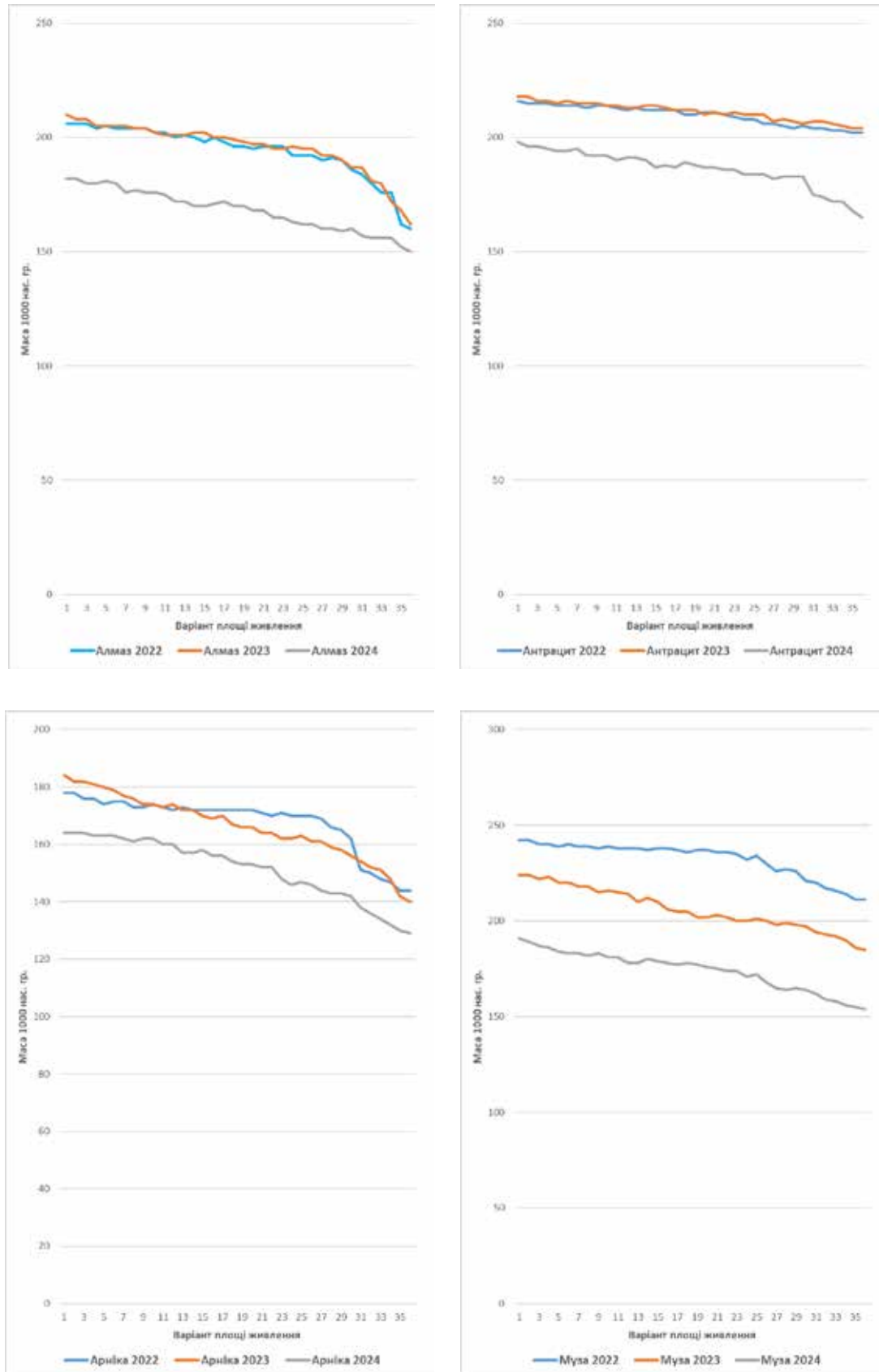


Рис. 3. Вплив площі живлення та погодних умов на формування маси 1 000 насінин у деяких сортів сої

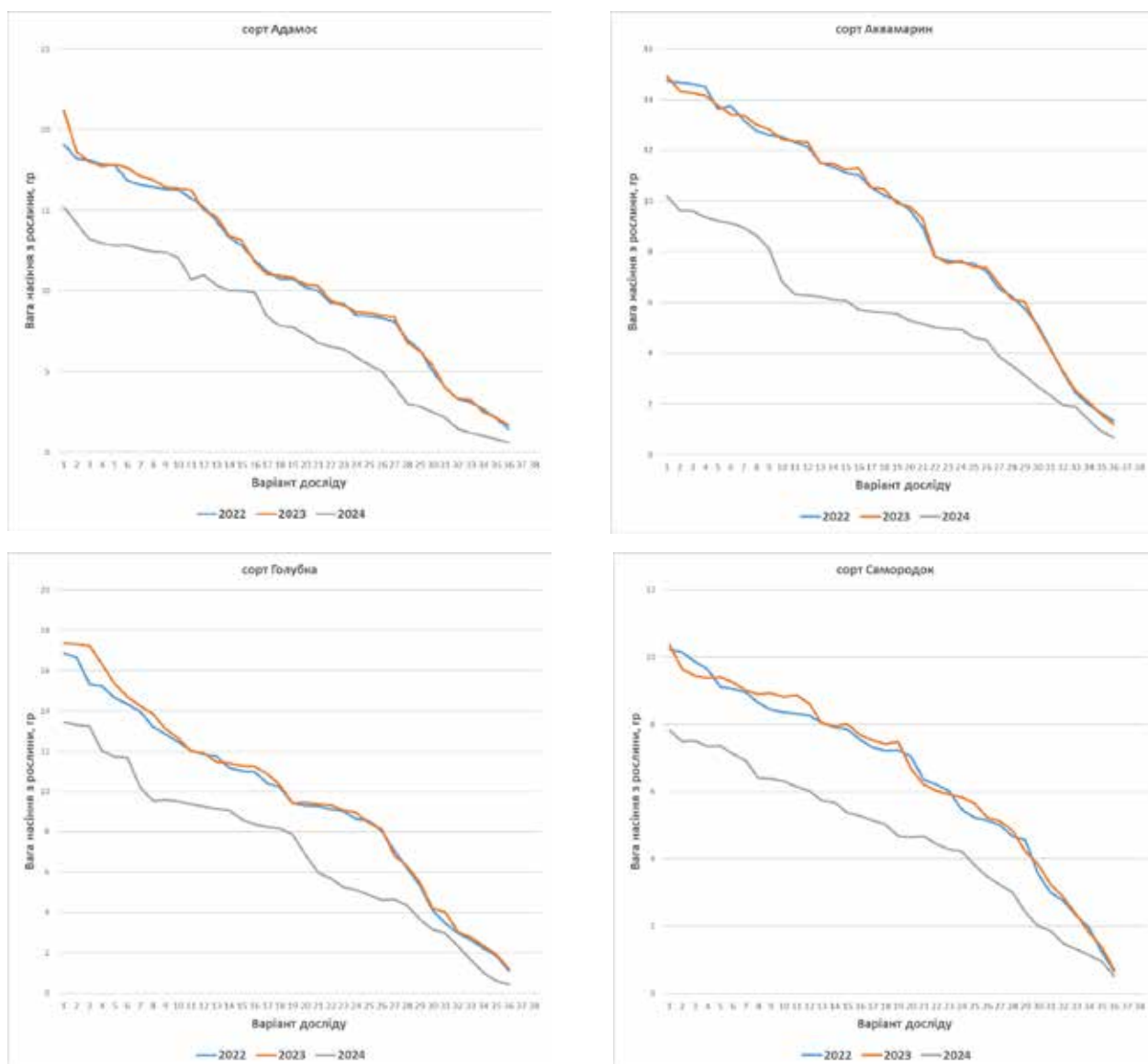


Рис. 4. Вплив площі живлення та погодних умов на формування маси насіння з рослини в деяких сортів сої

ливо приділяти увагу аналізу даної характеристики.

Найбільш значні зміни спостерігались у разі збільшення густоти посівів. Рослини сої реагували на це зменшенням маси насіння з однієї рослини. Проте в підсумку це незначно впливало на загальний рівень урожайності завдяки саме більшій густоті посівів. Умови року, як чинник впливу на формування маси насіння з рослини, мали вагоме значення. Особливо це простежується у 2024 р., коли були посушливі умови.

Результати аналізу підтверджують, що норма висіву насіння (отже, площа живлення) впливає на утворення кількості

насінин у рослинах сої, біологічні відмінності сорту мають вплив значно менший. Отже, найбільший вплив на формування цієї характеристики мають агротехнічні та біологічні чинники, меншою мірою – погодні умови в роки досліджень. Окрім того, насіння може не зав'язатися під негативним впливом погодних умов, більшою мірою, ніж бути втрачене у процесі досягання як таке, що вже сформоване.

Висновки

Соя, як світлолюбна культура, демонструє значну варіативність продуктивності рослин. Її врожайність залежить від багатьох чинників, як-от погодні умови (вологозабезпеченість), площа жив-

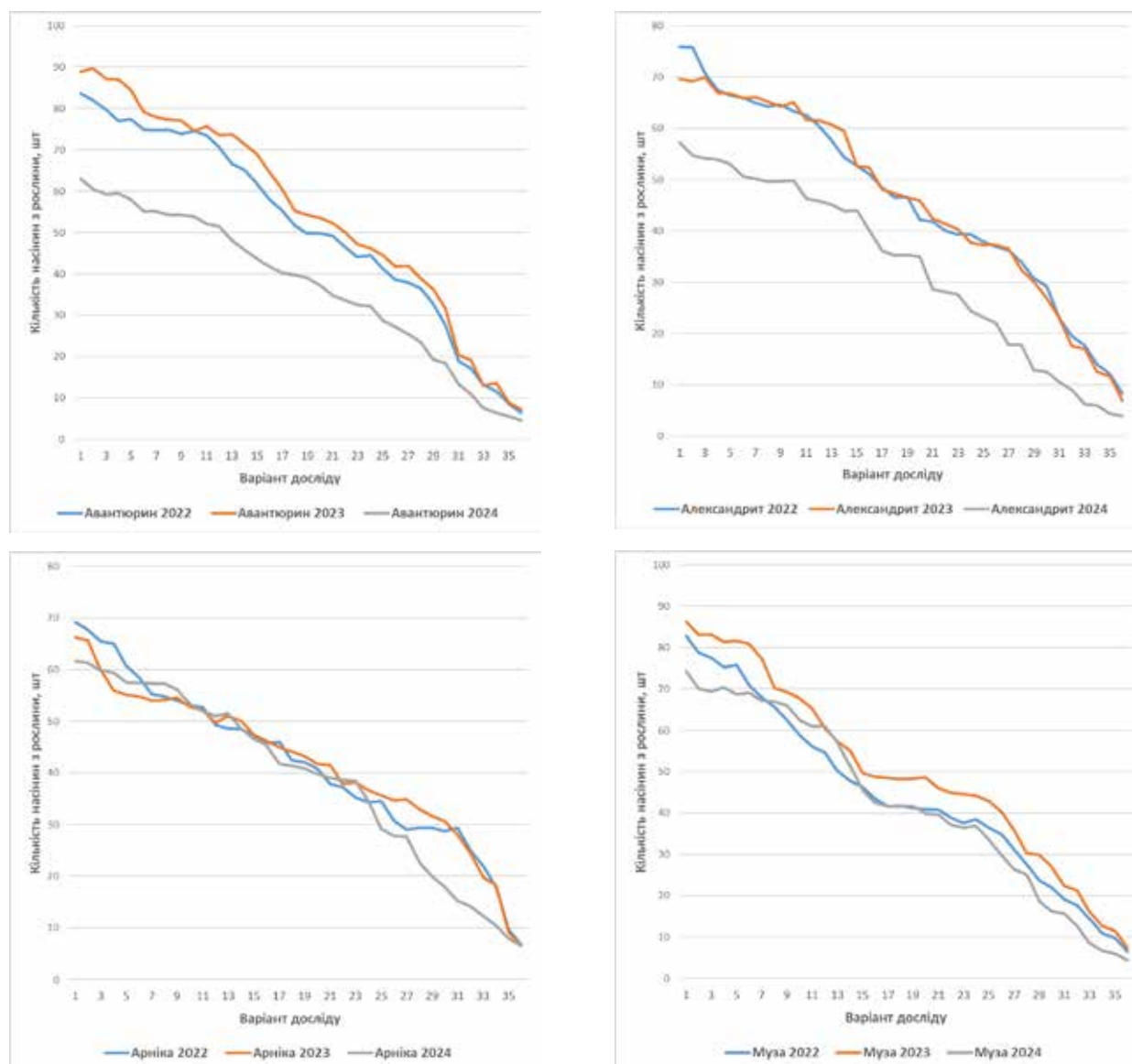


Рис. 5. Вплив площі живлення та погодних умов на формування кількості насіння з рослини в деяких сортів сої

лення, густота посіву, індивідуальна продуктивність. Тому дослідження впливу розмірів площі живлення на взаємодію рослин у посівах та їхню індивідуальну продуктивність є важливим науковим завданням.

Модельний променевий метод розміщення рослин сої пропонує ефективну оцінку широкого спектра густоти рослин на відносно компактній площі дослідження. Це дозволяє детально вивчати конкурентні взаємодії між рослинами.

Сорти сої, що вивчалися, демонстрували різну продуктивність за роками. У засушли-

вий 2024 р. спостерігалось зниження врожайності практично в усіх сортів і зміна характеру формування врожаю.

Ці дослідження є надзвичайно важливими для вибору сортів, особливо в контексті насінництва цієї культури. Вони включають аналіз великого обсягу даних про структуру врожаю та вплив різних чинників. Завдяки цьому можна підібрати сорт і розробити для нього агротехнічні умови, які забезпечать максимальний потенціал вирощування насіння. Окрім того, визначити сорт, що найменше реагує на різноманітні чинники вирощування.

Список використаної літератури

- Білявська Л.Г., Рибальченко А.М. Мінливість господарсько цінних ознак сої в умовах Лівобережного Лісостепу України. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2019. № 1. С. 65–72. <https://doi.org/10.31210/visnyk2019.01.08>.
- Білявська Л.Г., Пилипенко О.В. Поради щодо вибору сорту сої для виробника. *Агроексперт*. 2016. № 3. С. 26–27 [Електронний ресурс]. URL: <https://agroexpert.ua/poradi-sodo-viboru-sortu-soi-dla-virobnika/> (дата звернення: 27.01.2025).
- Пилипенко О.В., Брижак Я.В., Білявська Л.Г., Білявський Ю.В. Напрями та досягнення в насінництві сої. *Урожайність та якість продукції рослинництва за сучасних технологій вирощування (присвячено пам'яті професора Г.П. Жемели)* : матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції. ПДАУ. 2022. С. 124–127.
- Ревтьо О.Я., Золін О.О. Особливості вирощування сої за умов зміни клімату (оглядова). *Таврійський науковий вісник*. 2023. № 133. С. 105–112. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.133.15>.
- Рябуха С.С., Чернищенко П.В., Святченко С.І., Садовой О.О., Тесля Т.О. Вплив гідротермічних чинників довкілля на врожайність та біохімічний склад насіння сої. *Селекція і насінництво*. 2019. № 115. С. 93–102. <https://doi.org/10.30835/2413-7510.2019.172785>.
- Соя (*Glycine max* (L.) Merr.) : монографія / В.В. Кириченко та ін. Харків : НААН, Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва, 2016. 400 с.
- Соя: модель сорту, новостворені неопушені лінії, насінництво, фітосанітарний стан посівів : колективна монографія / за ред. Л.Г. Білявської. Полтава : ПДАУ, 2023. 187 с.
- Ходаніцька О.О., Погоріла Л.Г., Шевчук О.А., Ткачук О.О., Матвійчук О.А. Врожайність та якість насіння сої в умовах Правобережного Лісостепу України. *Корми і кормовиробництво*. 2024. № 98. С. 120–128. <https://doi.org/10.31073/kormovyrobnytstvo202498-11>.
- Цицюра Т.В., Темченко І.В., Семцов А.В. Статистична оцінка сортового потенціалу сої за показниками якісного хімічного складу насіння в умовах лісостепу правобережного. *Корми і кормовиробництво*. 2019. № 87. С. 19–26. <https://doi.org/10.31073/kormovyrobnytstvo201987-03>.
- Цицюра Т.В., Темченко І.В., Барвінченко С.В. Оцінка пластичності та стабільності показників якості насіння сортів сої різного еколого-географічного походження. *Корми і кормовиробництво*. 2021. № 92. С. 104–115. <https://doi.org/10.31073/kormovyrobnytstvo202192-10>.
- Шевніков М.Я., Логвиненко О.М. Оптимізація площі живлення різних сортів сої шляхом формування інтенсивної структури посіву. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2012. № 2. С. 30–33 [Електронний ресурс]. URL: <https://www.pdau.edu.ua/sites/default/files/visnyk/2012/02/030.pdf> (дата звернення: 20.04.2025).
- Шовкова О.В., Шевніков М.Я., Міленко О.Г. Особливості формування насінневої продуктивності рослинами сої залежно від елементів технології вирощування. *Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2020. № 2 (84). С. 167–175. <https://doi.org/10.31548/dopovidi2020.02.015>.
- Carciochi W., Schwalbert R., Andrade F., Corassa G., Carter P., Gaspar A., Schmidt J., Ciampitti I. Soybean Seed Yield Response to Plant Density by Yield Environment in North America. *Agronomy Journal*. 2019. Vol. 111. P. 1923–1932. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.10.0635>.
- Egli D.B. Plant density and soybean yield. *Crop Science*. 1988. Vol. 28. P. 977–981. <https://doi.org/10.2135/cropsci1988.0011183X0028000600023x>.

References

- Biliavska, L.H., & Rybalchenko, A.M. (2019). Minlyvist hospodarsko-tsinnykh oznak soi v umovakh Livoberezhnoho Lisostepu Ukrainy [Variability of economically valuable traits of soybeans in the conditions of the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii* [Bulletin of the Poltava State Agrarian Academy], 1, 65–72. <https://doi.org/10.31210/visnyk2019.01.08> [in Ukrainian].
- Biliavska, L.H., & Pylypenko, O.V. (2016). Porady shchodo vyboru sortu soi dlia vyrobnyka [Tips for choosing a soybean variety for a producer]. *Ahroekspert* [Agroexpert], 3, 26–27. [Electronic resource] URL: <https://agroexpert.ua/poradi-sodo-viboru-sortu-soi-dla-virobnika/> (access date 27.01.2025) [in Ukrainian].
- Kyrychenko, V.V., Riabukha, S.S., Kobyzieva, L.N., Posylaieva, O.O., & Chernyshenko, P.V. (2016). Soia (*Glycine max* (L.) Merr.) [Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.)]. Instytut roslinnytstva im. V. Ya. Yurieva. Kharkiv [in Ukrainian].

Pylypenko, O.V., Bryzhak, Ya.V., Biliavska, L.H., & Biliavskiy, Yu.V. (2022). Napriamy ta dosiahnennia u nasinnnytstvi soi. *Urozhainist ta yakist produktsii roslynnytstva za suchasnykh tekhnolohii vyroshchuvannia, prysviachena pamiati profesora H.P. Zhemely : materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii* [Materials of the All-Ukrainian Scientific and Practical Internet Conference], Poltava, PDAU. 124–127 [in Ukrainian].

Revto, O.Ia., & Zolin, O.O. (2023). Osoblyvosti vyroshchuvannia soi za umov zminy klimatu (ohliadova) [Features of soybean cultivation in the context of climate change (review)]. *Tavrïyskii naukovi visnyk* [Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University], 133, 105–112. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.133.15> [in Ukrainian].

Riabukha, S.S., Chernyshenko, P.V., Sviatchenko, S.I., Sadovoi, O.O., & Teslia, T.O. (2019). Vplyv hidrotermichnykh chynivkiv dovkillia na vrozhainist ta biokhimichni sklad nasinnia soi [Influence of hydrothermal environmental factors on yield and biochemical composition of soybean seeds]. *Selektsiia i nasinnnytstvo* [Breeding and seed production], 115, 93–102. <https://doi.org/10.30835/2413-7510.2019.172785> [in Ukrainian].

Soia: model sortu, novostvoreni neopusheni linii, nasinnnytstvo, fitosanitarnyi stan posiviv: kolektyvna. Monohrafiia (2023). [Soybeans: variety model, newly developed non-pubescent lines, seed production, phytosanitary condition of crops: a collective monograph.] / za nauk. red. Biliavska, L.H. Poltavskiy derzhavnyi ahrarnyi universytet [Poltava State Agrarian University]. Poltava [in Ukrainian].

Khodanitska, O.O., Pohorila, L.H., Shevchuk, O.A., Tkachuk, O.O., & Matviichuk, O.A. (2024). Vrozhainist ta yakist nasinnia soi v umovakh Pravoberezhnoho Lisostepu Ukrainy [Soybean seed yield and quality in the right bank forest-steppe of Ukraine.]. *Kormy i kormovyrobnytstvo* [Feed and feed production], 98, 120–128. <https://doi.org/10.31073/kormovyrobnytstvo202498-11> [in Ukrainian].

Tsytsiura, T.V., Temchenko, I.V., & Semtsov, A.V. (2019). Statystychna otsinka sortovoho potentsialu soi za pokaznykamy yakisnoho khimichnoho skladu nasinnia v umovakh lisostepu pravoberezhnoho [Statistical estimation of soybean varietal potential by indicators of seed chemical composition in the right-bank forest-steppe]. *Kormy i kormovyrobnytstvo* [Feed and feed production], 87, 19–26. <https://doi.org/10.31073/kormovyrobnytstvo201987-03> [in Ukrainian].

Tsytsiura, T.V., Temchenko, I.V., & Barvinchenko, S.V. (2021). Otsinka plastychnosti ta stabilnosti pokaznykiv yakosti nasinnia sortiv soi riznoho ekoloho-heohrafichnoho pokhodzhennia [Evaluation of the plasticity and stability of seed quality indicators of soybean varieties of different ecological and geographical origin]. *Kormy i kormovyrobnytstvo* [Feed and feed production], 92, 104–115 [in Ukrainian].

Shevnikov, M.Ya., & Lohvynenko, O.M. (2012). Optyimizatsiia ploshchi zhyvlennia riznykh sortiv soi shliakhom formuvannia intensyvnoi struktury posivu [Optimisation of the feeding area of different soybean varieties by forming an intensive sowing structure.]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii* [Bulletin of the Poltava State Agrarian Academy], 2, 30–33. [Electronic resource] URL: <https://www.pdau.edu.ua/sites/default/files/visnyk/2012/02/030.pdf> (access date 20.04.2025) [in Ukrainian].

Shovkova, O.V., Shevnikov, M.Ia., & Milenko, O.H. (2020). Osoblyvosti formuvannia nasinnievoi produktyvnosti roslynamy soi zalezho vid elementiv tekhnolohii vyroshchuvannia [Features of seed productivity formation by soybean plants depending on the elements of cultivation technology]. *Naukovi dopovidi NUBiP Ukrainy* [Scientific reports of NUBiP of Ukraine], 2 (84), 167–175. <https://doi.org/10.31548/dopovidi2020.02.015> [in Ukrainian].

Carciochi, W., Schwalbert, R., Andrade, F., Corassa, G., Carter, P., Gaspar, A., Schmidt, J., & Ciampitti, I. (2019). Soybean Seed Yield Response to Plant Density by Yield Environment in North America. *Agronomy Journal*, 111, 1923–1932. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.10.0635> [in English].

Egli, D.B. (1988). Plant density and soybean yield. *Crop Science*, 8, 977–981. <https://doi.org/10.2135/cropsci1988.0011183X002800060023x> [in English].

Отримано: 24.04.2025

Прийнято: 15.05.2025



Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 12
Український журнал природничих наук
№ 12

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

УДК 636.085:633.88:633.1

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.22>

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАХОДІВ ВИРОЩУВАННЯ НА ВИДОВИЙ ТА ХІМІЧНИЙ СКЛАД ТРАВСТОЮ БІНАРНИХ ПОСІВІВ БУРКУНУ БІЛОГО ЗІ ЗЛАКОВИМИ КУЛЬТУРАМИ

І. В. Свистунова¹, М. В. Захлебаєв², С. П. Полторецький³, А. М. Шувар⁴, І. І. Сеник⁵,
А. М. Баліцька⁶

До ключових факторів підвищення економічної ефективності тваринництва належить виробництво достатньої кількості якісних трав'янистих кормів, збалансованих за вмістом протеїну.

Одним з ефективних способів зменшення дефіциту білка та забезпечення тварин повноцінними кормами є вирощування бобово-злакових травосумішей, вегетативна маса яких містить

¹ кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри рослинництва
(Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ)
E-mail: irinasv@ukr.net
ORCID: 0000-0001-8922-1261

² кандидат сільськогосподарських наук
(Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ)
E-mail: maximzahliebaiyev@gmail.com
ORCID: 0009-0008-0253-8708

³ доктор сільськогосподарських наук, професор,
декан факультету агрономії
(Уманський національний університет садівництва, м. Умань)
E-mail: poltorec@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3334-0880

⁴ доктор сільськогосподарських наук, завідувач кафедри агробіотехнологій
(Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль)
E-mail: a.shuvar@wunu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-6016-0896

⁵ доктор сільськогосподарських наук,
професор кафедри агробіотехнологій
(Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль)
E-mail: senyk_ir@ukr.net
ORCID: 0000-0003-3249-2065

⁶ молодший науковий співробітник відділу Експертизи на відмінність, однорідність та стабільність сортів рослин
(Український інститут експертизи сортів рослин, м. Київ)
E-mail: Ludmilabalicka4@gmail.com
ORCID: 0000-0003-2994-0250

оптимальне поєднання білкових і вуглеводних сполук, мінеральних солей та інших необхідних поживних речовин. Серед традиційних багаторічних бобових культур, які використовуються в бобово-злакових агрофітоценозах, особливої уваги заслуговує буркун білий (*Melilotus albus*) – перспективна кормова культура, яка здатна забезпечувати стабільні врожаї зеленої маси навіть за несприятливих погодних умов. Однак наукової інформації щодо технологічних особливостей його вирощування в сумісних посівах зі злаковими культурами нааявно недостатньо. Мета досліджень – встановити особливості формування видового та хімічного складу травостою бінарних посівів буркуну білого з однорічними злаковими культурами залежно від технологічних заходів вирощування. Дослідження проводили у 2015–2017 рр. в умовах ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція». Встановлено, що загущення травостою бобовим компонентом призводило до пригнічення злакових культур, особливо в бінарних посівах із просом. Найвищу конкурентоспроможність та стійкість до загущення відмічено в суданської трави та кукурудзи. За технологічної моделі, що забезпечувала максимальну врожайність (51,5 т/га) і передбачала сівбу буркуну білого з нормою 16 кг/га в бінарному посіві із суданською травою на фоні внесення $N_{60}P_{90}K_{90}$ було одержано і найвищий вміст сирого протеїну в сухій речовині біомаси – 20,6%. При цьому вміст сирого жиру, сирової клітковини та БЕР становив відповідно 3,56, 23,21 та 43,11%. Найменшою кормовою цінністю в досліді відзначались посіви бобово-злакового фітоценозу з просом.

Ключові слова: бобово-злакові суміші, урожайність, видовий склад, сирий протеїн, сирий жир, сира клітковина, безазотисті екстрактивні речовини.

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL GROWING METHODS ON THE SPECIFIC AND CHEMICAL COMPOSITION OF THE BINARY CROP OF MELILOTUS ALBUS WITH CEREAL CROPS

I. V. Svystunova, M. V. Zakhliebaiev, S. P. Poltoretskyi, A. M. Shuvar, I. I. Senyk, L. M. Balitska

Production of sufficient quantities of high-quality grassy forages balanced in protein content is an important factor in increasing the economic efficiency of livestock farming. One of the effective ways to reduce protein deficiency and provide animals with complete feed is to grow legume-cereal grass mixtures, the vegetative mass of which contains an optimal combination of protein and carbohydrate compounds, mineral salts and other necessary nutrients. Among the traditional perennial legume crops used in legume-cereal agrophytocenoses, *Melilotus albus* deserves special attention – a promising fodder crop that is capable of providing stable yields of green mass even under adverse weather conditions. However, there is currently little scientific information on the technological features of growing *Melilotus albus* in intercropping with cereal crops. The aim of the research is to establish the features of the formation of the species and chemical composition of the herbage of binary crops of *Melilotus albus* with annual cereal crops depending on the technological cultivation measures. The research was conducted in 2015–2017 in the conditions of the SS of the NULES of Ukraine “Agronomic Research Station”. It was found that thickening of grass with a legume component led to the suppression of cereal crops, especially in binary crops with millet. The highest competitiveness and resistance to thickening were observed in sudan grass and corn.

The technological model, which provided maximum yield (51.5 t/ha) and provided for sowing white yam at a rate of 16 kg/ha in binary sowing with Sudan grass against the background of $N_{60}P_{90}K_{90}$ application, also obtained the highest content of crude protein in dry matter of biomass – 20.6%. At the same time, the content of crude fat, crude fiber and NFE was, respectively, 3.56, 23.21 and 43.11%. The lowest feed value in the experiment was noted in crops of legume-cereal phytocenosis with millet.

Key words: legume-cereal mixtures, yield, species composition, crude protein, crude fat, crude fiber, nitrogen-free extractives.

Вступ

Одним із ключових факторів підвищення економічної ефективності тваринництва є виробництво достатньої кількості трав'янистих кормів, збалансованих за вмістом перетравного протеїну. В усіх регіонах України нині спостерігається значний дефіцит високобілкового корму. Раціональним

способом розв'язання цієї проблеми та водночас ефективним інструментом для зниження собівартості тваринницької продукції є вирощування багаторічних бобових трав. Завдяки здатності фіксувати атмосферний азот і включати його в біологічний кругообіг ці культури можуть формувати дешевий рослинний протеїн без вико-

ристання дорогих азотних мінеральних добрив. Вирощування бобових трав здатне забезпечувати врожай сіна, що за ефективністю рівноцінно внесенню 100–150 кг мінерального азоту на 1 га злакових фітоценозів (Демидась і Захлебаєв, 2015; Вожегова та ін., 2017).

Включення бобових компонентів до складу травосумішей дає змогу одержувати високопоживні корми екологічним, економічно вигідним та енергозберігаючим способом. Поєднання біологічних і морфологічних особливостей злакових і бобових рослин у травостоях забезпечує ефективніше використання ґрунтової вологи, поживних речовин та сонячної енергії. Результатом такої взаємодії є вища врожайність посівів, підвищена поживна цінність одержаного корму, нижча його собівартість і загалом вища рентабельність тваринництва (Панахид та ін., 2017; Петриченко і Гетман, 2017). Отримані в такий спосіб корми більш повно відповідають фізіологічним потребам тварин, оскільки містять збалансоване поєднання білкових і вуглеводних сполук, мінеральних солей та інших необхідних поживних речовин. Збільшення обсягів вирощування таких посівів сприятиме суттєвому підвищенню поживної цінності кормів, дефіцит протеїну в яких нині досягає 25–30% (Панахид та ін., 2017; Свистунова та ін., 2024).

Отже, вирощування змішаних посівів є не новим технологічним рішенням, однак у зв'язку з кліматичними змінами та пов'язаними з ними зміщеними переважаючими строками випадання опадів потребує суттєвого удосконалення. У цьому контексті особливої актуальності набуває введення в кормові агрофітоценози більш продуктивних видів рослин, які потребують менших фінансових і матеріальних витрат (Захлебаєв, 2018; Свистунова та ін., 2024).

Однією з таких культур є буркун білий – перспективна кормова культура, яка здатна забезпечувати стабільні врожаї зеленої маси навіть за несприятливих погодних умов (Захлебаєв, 2018; Lahkim et al., 2021). Буркун можна успішно вирощувати в поєднанні з різними однорічними та багаторічними злаковими культурами, як-от стоколос безостий, кукурудза, просо, суданська трава, сорго, овес тощо. Вегетативна маса цієї білкової культури дуже висококалорійна та містить 18–22% сирого протеїну, а врожай зеленої маси та сіна може досягати відповідно 30 та 4 т/га. Кожен кілограм такого корму містить від 33 до 45 г перетравного

протеїну (Demydas et al., 2020; Kara, 2021; Kintl et al., 2022; Kamal et al., 2025). Цінними є посіви буркуну білого і як медоносною культурою (Razanov et al., 2024).

Культура має також низку агротехнічних переваг: коренева система цієї рослини проникає глибоко в ґрунт, сприяючи розчиненню та засвоєнню важкорозчинних поживних речовин, а також переміщенню їх у верхні горизонти. Завдяки цим властивостям буркун білий є незамінним для зміцнення схилів різного ступеня крутизни та найбільш адаптованим серед бобових трав до вирощування на карбонатно-солонцюватих ґрунтах (Sowa-Borowiec et al., 2022; Kazarina et al., 2023).

За сприятливих умов дворічного використання буркун білий залишає понад 12 т/га сухої органічної речовини, включно зі значними запасами поживних елементів: 230 кг азоту, 60 кг фосфору, 130 кг калію, 112 кг кальцію та 45 кг магнію, що робить його чудовим попередником для більшості сільськогосподарських культур. До того ж буркун білий проявляє виражену знезаражувальну дію на шкідливі організми в посівах багатьох сільськогосподарських культур. Зокрема, він ефективно знищує збудників кореневої гнилі злакових культур, а також пригнічує розвиток стеблової та зернової нематод і дротяників. Завдяки цим властивостям буркун білий є перспективною культурою для біологічного землеробства, сприяючи вирощуванню екологічно чистої та безпечної продукції (Демидась і Захлебаєв, 2015; Свистунова та ін., 2024).

Попри значний потенціал буркуну білого як кормової та агротехнічної культури, на сьогодні наукових робіт щодо його вирощування у змішаних посівах зі злаковими культурами нааявно вкрай мало. У зв'язку з вищезазначеним важливим науковим завданням, що має практичну цінність, є вивчення закономірностей впливу окремих агротехнічних чинників на продуктивність буркуново-злакових ценозів та їх поживну цінність.

Матеріал і методи

Мета досліджень – встановити особливості формування видового та хімічного складу травостою бінарних посівів буркуну білого з однорічними злаковими культурами залежно від технологічних заходів вирощування в умовах Лісостепу Правобережного.

Дослідження проводили у 2015–2017 рр. в умовах дослідного поля ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція» (Бабич,

1996). Польовий дослід закладали за схемою: фактор А – травосуміші (1. Буркун білий (контроль). 2. Буркун білий + кукурудза. 3. Буркун білий + просо. 4. Буркун білий + суданська трава. 5. Буркун білий + сорго); фактор В – норми висіву буркуну білого (1. 16 кг/га (контроль). 2. 18 кг/га. 3. 20 кг/га. 4. 22 кг/га); фактор С – удобрення (1. Без внесення добрив (контроль). 2. $N_{45}P_{45}K_{45}$. 3. $N_{60}P_{60}K_{60}$; 4. $N_{60}P_{90}K_{90}$).

Норма висіву злакових культур становила 70% від повної: кукурудза – 20 кг/га (60 тис. схожих насінин на 1 га), просо – 20 кг/га (2,25 млн схожих насінин на 1 га), суданська трава – 15 кг/га (1,5 млн схожих насінин на 1 га), сорго – 15 кг/га (0,375 млн схожих насінин на 1 га). Фосфорні й калійні добрива вносили у формах простого суперфосфату (19,5%) та хлористого калію (56%) під основний обробіток ґрунту, азотне добриво – у формі аміачної селітри (34,5%) під передпосівну культивуацію.

Ґрунт дослідної ділянки – чорнозем типовий малогумусний із вмістом рухомого фосфору (за Мачигінім) 40–55 мг/кг ґрунту, обмінного калію – 150–165 мг/кг ґрунту та легкогідролізованого азоту (за Корнфільдом) – 140–160 мг/кг ґрунту, рН сольової витяжки – 6,7–7,0.

Найбільш суттєві відхилення за основними параметрами погоди від багаторічної норми відмічені у 2015 та 2017 роках, протягом яких формування урожаю відбувалося на фоні підвищених температур повітря та тривалої відсутності опадів.

Оцінку видового складу травостою в досліджуваних посівах проводили за методикою Бабича О. (Бабич, 1996). Вміст сирих протеїну, жиру та клітковини визначали методом спектрометрії з використанням інфрачервоного аналізатора NIP Scanner model 4250. Вміст БЕР розраховували як різницю між загальним вмістом органічної речовини та вмістом сирих протеїну, жиру, клітковини й золи.

Результати та їх обговорення

До найголовніших чинників, що обумовлюють рівень врожайності та кормову цінність травостою належить його ботанічний склад – параметр, який суттєво обумовлюється агротехнічними та погодно-кліматичними умовами й біологічними особливостями культур. На динаміку ботанічного складу суттєво впливають кількість доступних макро- і мікроелементів, режим використання й удобрення, рівень вологості ґрунту, погодні умови впродовж вегетацій-

ного періоду тощо. Зокрема, систематичне використання фосфорно-калійних добрив сприяє збільшенню частки бобових культур і зменшенню кількості злаків і різнотрав'я. Внесення азотних і комплексних добрив, навпаки, стимулює ріст злакових культур і зменшує кількість бобових (Панахид та ін., 2017; Захлабаєв, 2018).

У наших дослідженнях за сівби буркуну білого в бінарних посівах зі злаковими компонентами незалежно від виду останніх відмічали домінування бобового компонента (табл. 1). На неудобрених ділянках частка буркуну білого залежно від норми його висіву у складі травосуміші становила 66,1–76,2%, тоді як частка злакового компонента – 23,8–33,9%. Зі збільшенням норми висіву буркуну частка його в травостой зростала від 66,1–74,3% за норми висіву 16 кг/га до 68,2–76,2 кг/га за норми висіву 22 кг/га.

Найбільший відсоток бобового компонента за відсутності удобрення – на рівні 74,0–76,2% – було відмічено за сівби буркуну білого в бінарних сумішах кукурудзою та сорго. Незалежно від норми висіву бобової культури її відсоток був найменшим за сумісної сівби із суданською травою – 66,1–68,2 кг/га.

Із внесенням мінеральних добрив відсоток участі злакового та бобового компонентів травосумішей змінювався. За всіх норм висіву найменша частка бобового компонента – на рівні 65,4–75,1% – отримана за внесення повного мінерального добрива в нормі $N_{60}P_{60}K_{60}$. За винятком змішаного посіву буркуну з кукурудзою внесення мінеральних добрив призводило до зниження частки участі бобового компонента в травостой. За такої норми мінеральних добрив, за більшістю варіантів сумішей відсоток вмісту злакових культур досягав максимальних значень. Серед варіантів удобрення відмічена тенденція до формування найменшого вмісту злакового компонента в сумішах за внесення збільшеної дози фосфорно-калійних добрив ($P_{90}K_{90}$) на фоні N_{60} .

Зі зростанням норми висіву буркуну білого частка бобового компонента у структурі травостою досліджуваних бінарних сумішей зростала та залежно від норми мінерального удобрення коливалась у межах від 66,1–74,3% за норми висіву 16 кг/га до 66,6–76,6% за норми висіву 22 кг/га. Загущення травостою бобовим компонентом мало пригнічуючий вплив на злакові культури, що особливо виразно простежува-

Таблиця 1

Видовий склад сумісних посівів буркуну білого з однорічними злаковими культурами, %

Травосуміш		Удобрєння	Норма висіву буркуну білого, кг/га			
			16	18	20	22
Буркун білий (контроль)	злаки	без добрив	–	–	–	–
	бобові		100	100	100	100
	злаки	N ₄₅ P ₄₅ K ₄₅	–	–	–	–
	бобові		100	100	100	100
	злаки	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	–	–	–	–
	бобові		100	100	100	100
	злаки	N ₆₀ P ₉₀ K ₉₀	–	–	–	–
	бобові		100	100	100	100
Буркун білий + кукурудза	злаки	без добрив	25,7	25,4	24,8	23,8
	бобові		74,3	74,6	75,2	76,2
	злаки	N ₄₅ P ₄₅ K ₄₅	26,4	25,3	25,3	24,4
	бобові		73,6	74,7	74,7	75,6
	злаки	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	26,6	25,8	25,3	24,9
	бобові		73,4	74,2	74,7	75,1
	злаки	N ₆₀ P ₉₀ K ₉₀	26,0	25,3	24,1	23,4
	бобові		74,0	74,7	75,9	76,6
Буркун білий + просо	злаки	без добрив	30,1	29,6	27,3	26,7
	бобові		69,9	70,4	72,7	73,3
	злаки	N ₄₅ P ₄₅ K ₄₅	31,1	30,4	28,2	27,5
	бобові		68,9	69,6	71,8	72,5
	злаки	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	31,3	30,7	28,5	27,8
	бобові		68,7	69,3	71,5	72,2
	злаки	N ₆₀ P ₉₀ K ₉₀	30,7	30,3	27,4	26,9
	бобові		69,3	70,7	72,6	73,1
Буркун білий + суданська трава	злаки	без добрив	33,9	33,4	32,3	31,8
	бобові		66,1	66,6	67,7	68,2
	злаки	N ₄₅ P ₄₅ K ₄₅	34,4	33,9	33,0	32,6
	бобові		65,6	66,1	67,0	67,4
	злаки	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	34,6	34,2	33,8	33,4
	бобові		65,4	65,8	66,2	66,6
	злаки	N ₆₀ P ₉₀ K ₉₀	33,9	33,5	32,9	32,6
	бобові		66,1	66,5	67,1	67,4
Буркун білий + сорго	злаки	без добрив	26,0	25,1	24,3	23,9
	бобові		74,0	74,9	75,7	76,1
	злаки	N ₄₅ P ₄₅ K ₄₅	26,7	25,8	24,9	24,3
	бобові		73,3	74,2	75,1	75,7
	злаки	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	26,9	26,1	25,1	24,9
	бобові		73,1	73,9	74,9	75,1
	злаки	N ₆₀ P ₉₀ K ₉₀	26,2	25,5	24,8	24,2
	бобові		73,8	74,5	75,2	75,8

НІР₀₅ загальне – 3,3; НІР₀₅ травосуміші – 1,5;
НІР₀₅ удобрєння – 1,1; НІР₀₅ норма висіву – 1,1

лося на варіанті бінарних посівів із просом на неудобрєних ділянках. Серед злакових культур найвищу конкурентоспроможність та стійкість до загушення відмічено в суданської трави й кукурудзи.

Зміна ботанічного складу травостою суттєво впливала на його хімічний склад (табл. 2). Оскільки за результатами досліджень урожайність змішаних посівів зі збільшенням норми висіву буркуну білого

знижувалася, то хімічний склад вегетативної маси представлено за норм висіву бобового компонента 16 та 22 кг/га. Найвищу продуктивність (51,5 т/га) вегетативної маси забезпечували змішані посіви буркуну білого із суданською травою за внесення повного мінерального добрива у нормі $N_{60}P_{90}K_{90}$ (рис. 1).

Визначено, що вміст сирого протеїну в сухій речовині вегетативної маси одновидових посівів бобової культури на неодобрених ділянках коливався в межах 20,55–20,90%. На аналогічних варіантах бінарних посівів зі злаковими культурами вміст азотвмісних сполук становив 17,85–19,30%. На фоні повного мінерального удобрення вміст

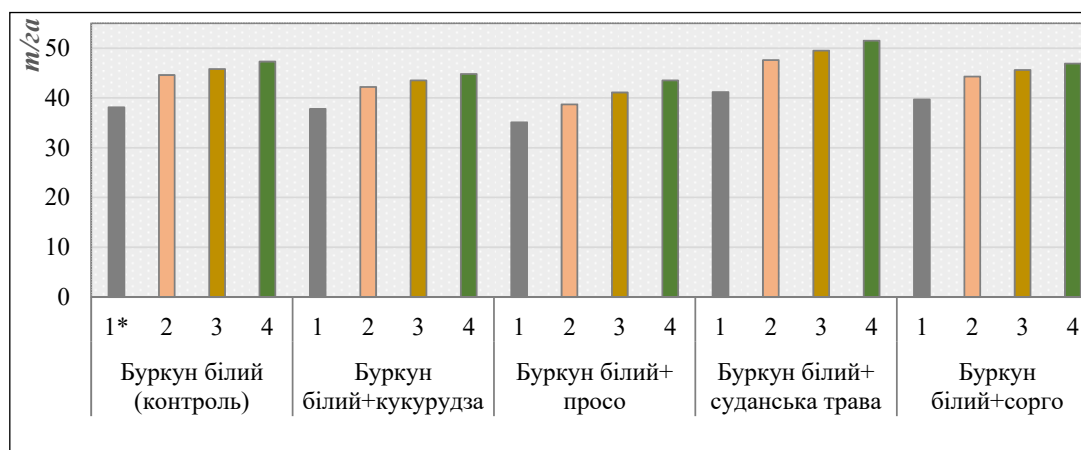


Рис. 1. Урожайність надземної маси буркуну білого та його сумісних посівів зі злаковими культурами за норми висіву бобового компонента 16 кг/га, т/га
Примітка: 1. Без внесення добрив (контроль); 2. $N_{45}P_{45}K_{45}$; 3. $N_{60}P_{60}K_{60}$; 4. $N_{60}P_{90}K_{90}$.

Таблиця 2

Хімічний склад вегетативної маси, % (у сухій речовині)

Травосуміші	Удобрєння	Сирий протеїн, %	Сирий жир, %	Сира клітковина, %	БЕР, %
1	2	3	4	5	6
Норма висіву, 16 кг/га					
Буркун білий (контроль)	без добрив	20,90	4,41	20,40	46,08
	$N_{45}P_{45}K_{45}$	21,70	4,52	19,91	45,34
	$N_{60}P_{60}K_{60}$	21,95	4,58	19,65	45,20
	$N_{60}P_{90}K_{90}$	22,20	4,64	19,31	45,16
Буркун білий + кукурудза	без добрив	19,12	3,71	24,12	44,54
	$N_{45}P_{45}K_{45}$	19,80	3,76	23,51	44,29
	$N_{60}P_{60}K_{60}$	20,30	3,81	23,34	43,84
	$N_{60}P_{90}K_{90}$	20,50	3,95	22,95	43,87
Буркун білий + просо	без добрив	19,30	3,41	25,03	44,03
	$N_{45}P_{45}K_{45}$	19,80	3,48	24,81	43,56
	$N_{60}P_{60}K_{60}$	19,90	3,53	24,53	43,65
	$N_{60}P_{90}K_{90}$	19,70	3,59	23,95	44,33
Буркун білий + суданська трава	без добрив	19,20	3,30	24,30	43,97
	$N_{45}P_{45}K_{45}$	19,90	3,41	23,82	43,46
	$N_{60}P_{60}K_{60}$	20,30	3,49	23,47	43,29
	$N_{60}P_{90}K_{90}$	20,60	3,56	23,21	43,11
Буркун білий + сорго	без добрив	18,10	3,22	24,80	45,55
	$N_{45}P_{45}K_{45}$	18,60	3,31	24,21	45,44
	$N_{60}P_{60}K_{60}$	19,10	3,34	24,02	45,03
	$N_{60}P_{90}K_{90}$	19,30	3,42	23,88	44,83

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5	6
Норма висіву, 22 кг/га					
Буркун білий (контроль)	без добрив	20,55	4,47	20,81	47,26
	N ₄₅ P ₄₅ K ₄₅	21,41	4,58	20,32	46,41
	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	21,73	4,61	20,03	46,10
	N ₆₀ P ₉₀ K ₉₀	21,98	4,73	19,74	45,57
Буркун білий + кукурудза	без добрив	18,88	3,79	24,44	46,08
	N ₄₅ P ₄₅ K ₄₅	19,53	3,86	23,91	45,67
	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	20,04	3,89	23,65	45,11
	N ₆₀ P ₉₀ K ₉₀	20,26	4,01	23,27	45,02
Буркун білий + просо	без добрив	19,05	3,45	25,42	45,33
	N ₄₅ P ₄₅ K ₄₅	19,58	3,58	25,11	44,85
	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	19,90	3,60	24,95	44,59
	N ₆₀ P ₉₀ K ₉₀	19,70	3,63	24,42	45,04
Буркун білий + суданська трава	без добрив	19,26	3,40	24,45	44,87
	N ₄₅ P ₄₅ K ₄₅	19,65	3,47	24,03	44,33
	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	20,01	3,56	23,64	43,96
	N ₆₀ P ₉₀ K ₉₀	20,54	3,61	23,41	43,33
Буркун білий + сорго	без добрив	17,85	3,34	25,18	46,60
	N ₄₅ P ₄₅ K ₄₅	18,34	3,39	24,62	46,09
	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	18,72	3,44	24,32	45,68
	N ₆₀ P ₉₀ K ₉₀	18,87	3,49	24,13	45,38

сирого протеїну у вегетативній масі більшості варіантів змішаних посівів зростав: за внесення N₄₅P₄₅K₄₅ – до 18,34–20,60%, за внесення N₆₀P₆₀K₆₀ – до 18,72–20,30, за внесення N₆₀P₉₀K₉₀ – до 18,87–20,6%. Виняток становили посіви буркуну білого з просом, у зеленій масі яких за внесення максимальної норми добрив вміст азотовмісних сполук знижувався. Загалом найвищий приріст білковості корму за внесення N₆₀P₉₀K₉₀ свідчить про позитивний вплив азотних добрив на злакові культури в сумішах, а також фосфорно-калійного живлення – на більш повний розвиток бобової культури.

Щодо норми висіву буркуну білого, то вищий вміст сирого протеїну в рослинній біомасі як одновидових посівах бобової культури, так і в бінарних сумішах зі злаковими культурами формувалася за меншої норми висіву 16 кг/га. Зі збільшенням норми висіву буркуну білого вміст азотовмісних речовин у вегетативній масі знижувався. За всіх варіантів удобрення та норм висіву найменший вміст сирого протеїну формували змішані травостої буркуну із сорго – 18,34–19,30%. Максимальний вміст азотовмісних речовин – на рівні 20,60% – одержано в травостой буркуну білого із суданською травою за внесення

N₆₀P₉₀K₉₀ і найменшої норми висіву буркуну.

Вміст сирого жиру, навпаки, зі зростанням загущеності посіву зростав до 4,42–4,67% в сухій речовині надземної маси одновидових посівів буркуну білого та 3,25–3,97% у біомасі бінарних посівів. За норми висіву 16 кг/га вміст жиру становив відповідно 4,41–4,64 та 3,22–3,95%. Збільшення норми внесення мінеральних добрив позитивно впливало на вміст жиру в рослинній біомасі. Найвищий вміст жиру в сухій масі відмічено в травостой бінарного посіву буркуну з кукурудзою.

Щодо вмісту клітковини відмічали подібну залежність – зі зростанням загущеності посівів через збільшення норми висіву буркуну білого вміст клітковини в сухій надземній біомасі зростав та становив 19,74–20,81% в одновидових посівах бобової культури та 23,27–25,11 – у змішаних. За сівби з нормою 16 кг/га вміст сирової клітковини становив відповідно 19,31–20,40 та 23,21–24,81%. Найвищий її вміст відмічали в бінарних посівах із просом і сорго. Зі збільшенням норми мінерального удобрення вміст сирової клітковини знижувався.

Вміст безазотистих речовин найвищим був у загущених посівах бінарних сумішей – у межах 43,33–46,09 %, тоді як за сівби бур-

куну білого з нормою висіву 16 кг/га вміст БЕР становив 43,11–45,55%. Зростання норми мінерального удобрення призводило до зменшення значення цього показника. Найвищий вміст безазотистих екстрактивних речовин – на рівні 44,83–45,55% – зафіксовано в бінарних посівах бобової культури із сорго.

Висновки

Встановлено, що загущення травостою бобовим компонентом призводило до пригнічення злакових культур, особливо в бінарних посівах із просом. Найвищу конкурентоспроможність та стійкість до загущення

відмічено в суданської трави та кукурудзи. За технологічної моделі, що забезпечувала максимальну врожайність (51,5 т/га) і передбачала сівбу буркуну білого з нормою 16 кг/га в бінарному посіві із суданською травою на фоні внесення $N_{60}P_{90}K_{90}$ було одержано і найвищий вміст сирого протеїну в сухій речовині біомаси – 20,6 %. При цьому вміст сирого жиру, сирі клітковини та БЕР становив відповідно 3,56, 23,21 та 43,11%. Найменшою кормовою цінністю в досліді відзначались посіви бобово-злакового фітоценозу з просом.

Список використаної літератури

- Бабич А.О. Методика проведення дослідів по кормовиробництву. Вінниця, 1994. 96 с.
- Вожегова Р.А., Влащук А.М., Прищепо М.М. Буркун білий однорічний: властивості та перспективи. 2017. [Електронний ресурс] URL: <https://agro-business.com.ua/agro/ahronomiia-sohodni/item/801-burkun-bilyi-odnorichnyi-vlastyvosti-ta-perspektyvy.html> (дата звернення 10.04.2025).
- Демидась Г.І., Захлебаєв М.В. Значення буркуну білого в кормовиробництві. *Науковий вісник НУБіП України*. 2015. Вип. 210. С. 18–21.
- Захлебаєв М.В. Продуктивність буркуну білого в одновидових та сумісних посівах зі злаковими культурами в залежності від мінерального живлення та норм висіву на чорноземах типових в умовах Правобережного Лісостепу України. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2018. Вип. 2 (72). [Електронний ресурс] URL: http://www.nbu.gov.ua/ejournals/Nd/2011_4/11ksm.pdf. (дата звернення 16.11.2023).
- Панахид Г.Я., Коник Г.С., Мізерник Д.І., Ярмолюк М.Т. Створення та використання лучних ценозів Карпатського регіону : монографія. Львів : СПОЛОМ, 2017. 300 с.
- Петриченко В.Ф., Гетман Н.Я. Фактори підвищення продуктивності агрофітоценозів багаторічних бобових трав в умовах Лісостепу Правобережного. *Корми і кормовиробництво*. 2017. Вип. 84. С. 3–9.
- Свистунова І.В., Захлебаєв М.В., Чумаченко І.П., Полторецький С.П., Соломон В.В., Сенік І.І., Шувар А.М. Формування урожайності надземної маси буркуну білого в одновидових та сумісних посівах в умовах правобережного Лісостепу України. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2024. № 1 (107). [http://dx.doi.org/10.31548/dopovid.1\(107\).2024.008](http://dx.doi.org/10.31548/dopovid.1(107).2024.008).
- Demydas G., Zakhlebaev M., Shuvar I., Lipinska H., Wylupek, T. The formation of the leaf surface of white melilot (*Melilotus albus*) depending on fertilization, seed mix and seeding rate. *Agronomy Science*, 2020. Vol. 75 (4). <http://dx.doi.org/10.24326/as.2020.4.9>.
- Kamal M., Cao Y., Gao J., Li N., Zhao X. Effects of feeding *Melilotus albus* on growth performance, carcass traits, and meat quality of Hu sheep. *Animal Advances*. 2025. P. e010. <http://dx.doi.org/10.48130/animadv-0025-0008>.
- Kara K. Nutrient matter, fatty acids, in vitro gas production and digestion of herbage and silage quality of yellow sweet clover (*Melilotus officinalis* L.) at different phenological stages. *Journal of Animal and Feed Sciences*. Polish Academy of Sciences. Poland. 2021. Vol. 30 (2). P. 128–140. <http://dx.doi.org/10.22358/jafs/136401/2021>.
- Kazarina A.V., Marunova L.K., Atakova E.A., Abramenko I.S. Ecological plasticity and adaptive potential of annual form of white sweet clover (*Melilotus albus* Medik). In *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 411, p. 02045). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341102045>.
- Kintl A., Hunady I., Holátko J., Vitez T., Hammerschmiedt T., Brtnický M., Ondrisková V., Elbl J. Using the mixed culture of fodder mallow (*Malva verticillata* L.) and white sweet clover (*Melilotus albus* Medik.) for methane production. *Fermentation*. 2022. Vol. 8 (3). P. 94. <https://doi.org/10.3390/fermentation8030094>.
- Lahkim M., Mohammed A., Aarab A., Brigui J. Nutritive value of *Melilotus officinalis* ecotypes from the North-western Moroccan pastures. Options Méditerranéennes Series A. International Centre for Advanced Mediterranean. *Agronomic Studies*. 2021. Vol. 125. P. 579–582.

Razanov S.F., Ibatulin I.I., Razanov O.S., Dydiv A.I., Voynalovich M.V., Lysak H.A. and Lopotych M.J. Productivity of bee families and biomonitoring of corbicular pollen and war-affected honeybee foraging sites with cultivated honey clover (*Melilotus albus*). *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2024. Vol. 15 (1) (Feb. 2024). P. 171–176. <https://doi.org/10.15421/022425>.

Sowa-Borowiec P., Jarecki W., Dżugan M. The Effect of Sowing Density and Different Harvesting Stages on Yield and Some Forage Quality Characters of the White Sweet Clover (*Melilotus albus*). *Agriculture*. 2022. Vol. 12 (5). P. 575. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050575>.

References

Babych, A.O. (1994). *Metodyka provedennia doslidiv po kormovyrobnytstvu* [Methodology for conducting experiments on feed production]. Vinnytsia, 96 p. [in Ukrainian].

Vozhehova, R.A., Vlashchuk, A.M., Pryshchepo, M.M. (2017). Burkun bilyi odnorichnyi: vlastyvo-
sti ta perspektyvy [Annual white yam: properties and prospects]. [Electronic resource] URL: [https://agro-business.com.ua/agro/ahronomiia-sohodni/item/801-burkun-bilyi-odnorichnyi-vlastyvo-
sti-ta-perspektyvy.html](https://agro-business.com.ua/agro/ahronomiia-sohodni/item/801-burkun-bilyi-odnorichnyi-vlastyvo-
sti-ta-perspektyvy.html) (access date 10.04.2025) [in Ukrainian].

Demydas, H.I., Zakhliebaiev, M.V. (2015). Znachennia burkunu biloho v kormovyrobnytstvi [The importance of white sedge in feed production]. *Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy* [Scientific Bulletin of NUBiP of Ukraine], 210, 18–21 [in Ukrainian].

Zakhliebaiev, M.V. (2018). Produktivnist burkunu biloho v odnovydovykh ta sumisnykh posivakh zi zlakovymy kulturamy v zalezhnosti vid mineralnogo zhyvlennia ta norm vysivu na chornozemakh typovykh v umovakh Pravoberezhnogo Lisostepu Ukrainy [Productivity of white clover in single-species and mixed crops with cereal crops depending on mineral nutrition and seeding rates on chernozems typical for the conditions of the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine]. *Naukovi dopovidi NUBiP Ukrainy* [Scientific Bulletin of NUBiP of Ukraine], 2 (72). [Electronic resource] URL: http://www.nbu.gov.ua/ejournals/Nd/2011_4/11ksm.pdf (access date 16.11.2023) [in Ukrainian].

Panakhid, H.Ya., Konyk, H.S., Mizernyk, D.I., & Yarmoliuk, M.T. (2017). Stvorennia ta vykorystannia luchnykh tsenoziv Karpatskoho rehionu: monohrafiia [Creation and use of meadow coenoses of the Carpathian region: monohrafiia]. Lviv : SPOLOM, 300 p. [in Ukrainian].

Petrychenko, V.F., & Hetman, N.Ya. (2017). Faktory pidvyshchennia produktyvnosti ahrofitotsenoziv bahatorichnykh bobovykh trav v umovakh Lisostepu Pravoberezhnogo [Factors increasing the productivity of agrophytocenoses of perennial leguminous grasses in the conditions of the Right Bank Forest-Steppe]. *Kormy i kormovyrobnytstvo* [Feed and feed production], 84, 3–9 [in Ukrainian].

Svystunova, I.V., Zakhliebaiev, M.V., Chumachenko, I.P., Poltoretskyi, S.P., Solomon, V.V., Senyk, I.I., & Shuvar, A.M. (2024). Formuvannia urozhainosti nadzemnoi masy burkunu biloho v odnovydovykh ta sumisnykh posivakh v umovakh pravoberezhnogo Lisostepu Ukrainy [Formation of the above-ground mass yield of white sedge in single-species and mixed crops in the conditions of the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine]. *Naukovi dopovidi NUBiP Ukrainy* [Scientific Bulletin of NUBiP of Ukraine], 1 (107). [http://dx.doi.org/10.31548/dopovidi.1\(107\).2024.008](http://dx.doi.org/10.31548/dopovidi.1(107).2024.008) [in Ukrainian].

Demydas, G., Zakhlebaev, M., Shuvar, I., Lipinska, H., & Wylupek, T. (2020). The formation of the leaf surface of white melilot (*Melilotus albus*) depending on fertilization, seed mix and seeding rate. *Agronomy Science*, 75 (4). <http://dx.doi.org/10.24326/as.2020.4.9> [in English].

Kamal, M., Cao, Y., Gao, J., Li, N., & Zhao, X. (2025). Effects of feeding *Melilotus albus* on growth performance, carcass traits, and meat quality of Hu sheep. *Animal Advances*. e010 <http://dx.doi.org/10.48130/animadv-0025-0008> [in English].

Kara, K. (2021). Nutrient matter, fatty acids, in vitro gas production and digestion of herbage and silage quality of yellow sweet clover (*Melilotus officinalis* L.) at different phenological stages. Polish Academy of Sciences. Poland. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 30 (2), 128–140. <http://dx.doi.org/10.22358/jafs/136401/2021> [in English].

Kazarina, A.V., Marunova, L.K., Atakova, E.A., & Abramenko, I.S. (2023). Ecological plasticity and adaptive potential of annual form of white sweet clover (*Melilotus albus* Medik). In *E3S Web of Conferences*, 411, 02045. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341102045> [in English].

Kintl, A., Hunady, I., Holátko, J., Vitez, T., Hammerschmiedt, T., Brtnický, M., Ondrisková, V., & Elbl, J. (2022). Using the mixed culture of fodder mallow (*Malva verticillata* L.) and white sweet clover (*Melilotus albus* Medik.) for methane production. *Fermentation*, 8 (3), 94. <https://doi.org/10.3390/fermentation8030094> [in English].

Lahkim, M., Mohammed, A., Aarab, A., & Brigui, J. (2021). Nutritive value of *Melilotus officinalis* ecotypes from the North-western Moroccan pastures. *Options Méditerranéennes Series A. International Centre for Advanced Mediterranean Agronomic Studies*, 125, 579–582 [in English].

Razanov, S.F., Ibatulin, I.I., Razanov, O.S., Dydiv, A.I., Voynalovich, M.V., Lysak, H.A., & Lopotych, M.J. (2024). Productivity of bee families and biomonitoring of corbicular pollen and war-affected honeybee foraging sites with cultivated honey clover (*Melilotus albus*). *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 15, 1 (Feb. 2024), 171–176. <https://doi.org/10.15421/022425> [in English].

Sowa-Borowiec, P., Jarecki, W., & Dżugan, M. (2022). The Effect of Sowing Density and Different Harvesting Stages on Yield and Some Forage Quality Characters of the White Sweet Clover (*Melilotus albus*). *Agriculture*, 12 (5), 575. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050575> [in English].

Отримано: 25.04.2025

Прийнято: 15.05.2025



УДК 633.17:631.559
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.23>

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СОРГО ЦУКРОВОГО В УМОВАХ ЗАХІДНОГО РЕГІОНУ УКРАЇНИ

А. А. Сітник¹

Сорго цукрове нині є популярною кормовою та біоенергетичною культурою в усьому світі. Його високу цінність зумовлює здатність витримувати посушливі умови та зростати на бідних ґрунтах, що робить цю культуру надзвичайно перспективною в умовах змін клімату. В Україні сорго цукрове активно використовується для силосування, виробництва зеленої маси, а також як сировина для отримання патоки таї етанолу.

У статті представлено результати досліджень впливу різних варіантів удобрення на формування продуктивності сорго цукрового в умовах Західного регіону України. Дослідження виконувалися на дослідному полігоні кафедри лісового і аграрного менеджменту Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника. У дослідженнях застосовано польові, лабораторні, математичні, статистичні та розрахункові методи. Установлено, що кліматичні умови років дослідження суттєво відрізнялися за вологозабезпеченням. Зокрема, у 2023 році спостерігалось перевищення середньобагаторічної норми опадів, що сприяло стабільному росту рослин, тоді як у 2024 році кількість опадів була нижчою за норму, що вплинуло на динаміку розвитку культури.

Проаналізовано вплив агротехнічних заходів, зокрема застосування мінерального добрива $N_{30}P_{30}K_{30}$, регулятора росту Блек Джек КС та мікродобрива Інтермаг Титан, на ріст, біометричні показники та врожайність зеленої маси сорго цукрового. Встановлено, що висота рослин є важливим індикатором адаптації культури до умов вирощування та рівня агрохімічного забезпечення. Найсприятливіші погодні умови спостерігалися у 2023 році, що сприяло досягненню максимальної висоти рослин сорту Фаворит. У 2024 році, який характеризувався несприятливими погодними умовами на період сієби, висота рослин цього ж варіанту була на 4,6 см меншою та становила 215,8 см.

На контролі врожайність зеленої маси сорго цукрового за період досліджень становила 56,2 т/га. Використання регулятора росту Блек Джек КС дозволило досягти врожайності 60,2 т/га, що на 6,6% вище за контроль та 3,0% з варіантом внесення мінерального добрива. Обробка посівів мікродобривом Інтермаг Титан підвищила врожайність до 61,5 т/га, що перевищило контрольний варіант на 5,3 т/га. Максимальний рівень урожайності – 63,2 т/га – було зафіксовано за умов комбінованого застосування добрива $N_{30}P_{30}K_{30}$ та мікродобрива Інтермаг Титан, що забезпечило приріст на 11,1% порівняно з контролем. Високий результат також отримано у варіанті спільного використання $N_{30}P_{30}K_{30}$ і Блек Джек КС – 63,2 т/га.

¹ аспірант кафедри лісового і аграрного менеджменту
(Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ)
e-mail: andrii.sitnyk.19@pnu.edu.ua
ORCID: 0009-0007-5647-4239

Отримані результати свідчать про високий потенціал сорго цукрового як культури, здатної забезпечувати стабільні показники врожайності за різних погодних умов, за умови оптимізації елементів технології вирощування.

Ключові слова: сорго цукрове, мінеральне живлення, урожайність, висота рослин, агрокліматичні умови, удобрення.

FEATURES OF SUGAR SORGHUM PRODUCTIVITY FORMATION UNDER THE CONDITIONS OF THE WESTERN REGION OF UKRAINE

A. A. Sitnyk

Sweet sorghum is currently a popular forage and bioenergy crop worldwide. Its high value lies in its ability to withstand drought conditions and grow in poor soils, making it an extremely promising crop in the context of climate change. In Ukraine, sweet sorghum is actively used for silage production, green biomass generation, and as a raw material for obtaining molasses and ethanol.

The article presents the results of studies on the impact of different fertilization options on the productivity of sugar sorghum under the conditions of the Western region of Ukraine. The research was conducted at the experimental field of the Department of Forestry and Agricultural Management at Vasyl Stefanyk Precarpathian National University. The study used field, laboratory, mathematical, statistical, and calculation methods.

It was established that the climatic conditions of the years under study differed significantly in terms of moisture availability. Specifically, in 2023, there was an excess of the long-term average precipitation, which contributed to stable plant growth, while in 2024, the amount of precipitation was below the norm, which influenced the dynamics of crop development.

The impact of agronomic measures, including the application of mineral fertilizer $N_{30}P_{30}K_{30}$, the growth regulator Black Jack KS, and the micronutrient fertilizer Intermag Titan, on growth, biometric indicators, and green biomass yield of sugar sorghum was analyzed. It was found that plant height is an important indicator of the crop's adaptation to growing conditions and the level of agrochemical support.

The most favorable weather conditions were observed in 2023, which contributed to the maximum plant height of the Favorit variety. In 2024, which was characterized by unfavorable weather conditions during the sowing period, the height of plants of the same variety was 4.6 cm lower and amounted to 215.8 cm.

In the control variant, the green biomass yield of sugar sorghum during the study period was 56.2 t/ha. The use of the growth regulator Black Jack KS increased the yield to 60.2 t/ha, which was 6.6% higher than the control and 3.0% higher than the variant with mineral fertilizer application. Treatment with the micronutrient fertilizer Intermag Titan increased the yield to 61.5 t/ha, exceeding the control by 5.3 t/ha. The maximum yield of 63.2 t/ha was recorded with the combined application of the $N_{30}P_{30}K_{30}$ fertilizer and Intermag Titan micronutrient, providing an 11.1% increase compared to the control. A high result was also achieved in the variant with combined use of $N_{30}P_{30}K_{30}$ and Black Jack KS – 63.2 t/ha.

The obtained results indicate the high potential of sugar sorghum as a crop capable of providing stable yield indicators under different weather conditions, provided that the elements of cultivation technology are optimized.

Key words: sugar sorghum, mineral nutrition, yield, plant height, agro-climatic conditions, fertilization.

Вступ

У зв'язку з енергетичною залежністю України та зниженням урожайності основних сільськогосподарських культур, спричиненим поступовими змінами клімату, зокрема глобальним потеплінням, особливої актуальності набуває питання впровадження нових видів культур, здатних забезпечити стабільне виробництво у змінних агрокліматичних умовах (Ковальчук та ін., 2009; Каленська і Гриннюк, 2013).

Серед таких культур пріоритет віддається видам, що характеризуються висо-

кою врожайністю, посухостійкістю та невибагливістю до умов вирощування. Значну увагу в цьому контексті привертають злакові енергетичні культури, зокрема міскантус, світчграсс, сорго й інші. Основними вимогами до сільськогосподарських культур, які використовуються у сфері біоенергетики, є низька собівартість продукції та здатність забезпечити стабільну сировинну базу (Мулярчук, 2016; Мулярчук і Кобернюк, 2017; Karbivska et al., 2023).

Серед перелічених культур перспективною для вирощування в різних ґрунтово-клі-

матичних зонах України є сорго цукрове, яке поєднує високу адаптивність до стресових умов із високим потенціалом урожайності. Його впровадження у виробництво може стати одним із ключових чинників формування сталої біоенергетичної системи країни (Дремлюк та ін., 2013; Ahmed et al., 2014; Олексій і Буряк, 2020).

Цукрове сорго є популярною кормовою та енергетичною культурою в багатьох країнах світу завдяки високому вмісту цукрів (14–20%) і здатності витримувати посуху та високі температури. Щоб забезпечити стабільні врожаї зеленої маси, важливо вирощувати найпродуктивніші сорти й гібриди, а також суворо дотримуватися агротехнічних вимог з урахуванням місцевих ґрунтово-кліматичних умов (Чернова та ін., 2020).

Сільськогосподарські виробники використовують сорго в різних напрямках – для виготовлення борошна, круп, спирту та крохмалю. Завдяки високому вмісту вуглеводів у соку стебел культура слугує сировиною для отримання біоетанолу та харчового сиропу. Після віджимання соку суха стеблова маса переробляється на тверде паливо (Гументик і Бондар, 2006).

В Україні сорго цукрове активно використовується для силосування, виробництва зеленої маси, а також як сировина для отримання патоки й етанолу. Етанол виробляють із клітинного соку, який міститься в листках і стеблах рослини та має високий вміст цукру – до 20%. Завдяки такому хімічному складу сік сорго активно застосовують для виробництва біопалива (зокрема, біогазу та паливних пелет), а також як сировину для отримання цукру, харчового сиропу та меду (Ганженко, 2012).

Застосування добрив не лише підвищує врожайність, а й сприяє покращенню якості отриманої продукції. Це виражається у зростанні вмісту білка, жирів у зерні, а також у збільшенні кількості сухої речовини та кормових одиниць у рослинній масі сорго (Kurilo et al., 2015).

Найбільш обмежувальним елементом живлення для сорго є азот, потреба в якому задовольняється природною родючістю ґрунту лише на 38,7%. Забезпеченість фосфором становить 53,2%, а калієм – 93,7%. Найінтенсивніше рослини сорго споживають азот у періоди активного росту та формування генеративних органів – за 10–15 днів до початку викидання волоті та впродовж 10–15 днів після фази цвітіння.

Засвоєння фосфору починається вже на початкових етапах вегетації, до моменту викидання волоті рослина вбирає до 50% його загальної кількості. Калій надходить у рослину рівномірно впродовж усього вегетаційного періоду (Іваніна та ін., 2021; Попова і Кулик, 2024).

Основною метою вирощування будь-яких сільськогосподарських культур є досягнення високої продуктивності, яка забезпечує потреби в харчовій продукції та сировині для переробки. Дослідження особливостей росту та розвитку сорго цукрового дає змогу комплексно оцінити продуктивність як інтегральний показник ефективності застосованих елементів агротехнології, а також виявити залежність урожайності від ґрунтово-кліматичних умов і систем удобрення для конкретного сорту.

Метою дослідження було встановлення особливостей формування біометричних показників і урожайності сорго цукрового залежно від удобрення.

Матеріал і методи

Дослідження проводились упродовж 2023–2024 рр. на дослідному полігоні кафедри лісового і аграрного менеджменту Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника. Польовий дослід був закладений рендомізованим методом у трикратному повторенні. Ґрунтові умови дослідної ділянки характеризуються дерново-підзолистим поверхнево-оглеєним типом ґрунтів. За механічним – це важкоглинистий ґрунт із крупнопилуватою структурою, що має розвинений гумусовий горизонт потужністю приблизно 46 см (табл. 1).

Таблиця 1
Агрохімічна характеристика ґрунтів дослідної ділянки

Показник	Значення
Тип ґрунту	Дерново-підзолистий поверхнево-оглеєний
Механічний склад	Важкоглинистий із крупнопилуватою структурою
Потужність гумусового горизонту, см	46
Кислотність, pH	4,8
Вміст гумусу, %	2,73
Вміст азоту, мг/кг	78,2
Вміст фосфору, мг/кг	43,4
Вміст калію, мг/кг	98,3

Дослідженнями вивчалися шість варіантів удобрення сорго цукрового: контроль (обробка водою), $N_{30}P_{30}K_{30}$, Блек Джек КС, Інтермаг Титан, $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Блек Джек КС, $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан.

Площа посівної ділянки – 50 м², облікової – 30 м², повторність досліду – чотириразова. Дослідження проводились за методом систематичних повторювань: у кожному повторенні варіанти досліду розміщували по ділянках послідовно. У досліді вивчали вплив макро- та мікродобрив на продуктивність сорго сорту Фаворит. Цей сорт включений до Державного реєстру із 2003 р. В умовах Лісостепу врожайність сухої речовини становила 93,9 т/га, а насіння – 32,8 т/га. Пошкодження хворобами: антракноз – 2,0%, гелмінтоспориоз – 3,3%. Сорт має таку стійкість у Лісостепу: до посухи – 8,2 бала, до вилягання – 8,6 бала, до осипання – 9,0 бала. Вміст білка в зоні Лісостепу – 10,1%, клітковини – 28,2%. Час до дозрівання: для сухої речовини – 78 днів, для насіння – 124 дні. Основне призначення сорго – для силосування.

Сівбу проводили у травні на глибину 4–6 см, ширина міжрядь – 45 см. Агротехнічні заходи вирощування відповідають загальноприйнятим, за винятком тих, що були предметом дослідження.

Результати та обговорення

Вирощування сорго цукрового передбачає виконання комплексу агротехнічних заходів, кожен із яких відіграє важливу роль у стимулюванні ростових процесів, розвитку рослин і забезпеченні їхньої високої продуктивності. Різні елементи технології вирощування впливають на врожайність, створюють оптимальні умови для росту, що позитивно позначається на фізіологічному стані рослин та їхніх біометричних характеристиках. Одним із важливих показників є висота рослин, яка тісно пов'язана з рівнем удобрення і слугує важливим індикатором адаптації сорго до умов вирощування. Залежно від мети використання культури –

для сінажу, силосу чи зеленого корму – рекомендується проводити збирання сорго на різних етапах його розвитку.

Висота рослин сорго цукрового є не лише показником їхнього лінійного розвитку, а й чинником, що значно впливає на потенційну врожайність культури. Зокрема, добуток висоти рослин на діаметр стебла часто використовується як інтегральний показник продуктивності вегетативної маси. Дослідження показали, що у фазі воскової стиглості висота рослин варіювала в межах 198,5–220,4 см, найвищі рослини зафіксовано в шостому варіанті досліду (табл. 2). Найсприятливіші погодні умови спостерігалися у 2023 р., що сприяло досягненню максимальної висоти рослин сорту Фаворит. У 2024 р., який характеризувався несприятливими погодними умовами на період сівби, висота рослин цього ж варіанту була на 4,6 см меншою та становила 215,8 см. Найменшу висоту – 198,5 см – сформували рослини сорго цукрового на контрольному варіанті.

Показники густоти стояння рослин сорго цукрового варіювали залежно від року проведення досліджень. Найвищу густоту було зафіксовано у 2023 р., завдяки сприятливим погодним умовам (рис. 1).

Натомість у 2024 р. густота стояння була найнижчою через брак опадів під час сівби та підвищену суму температур порівняно з попереднім роком дослідження.

Протягом 2023–2024 рр. спостерігалися значні відхилення кількості опадів від середньобагаторічних норм, що суттєво вплинуло на агрокліматичні умови. У 2023 р. кліматичні умови були сприятливішими для розвитку сорго цукрового, середньомісячна температура повітря в період вегетації (травень – серпень) коливалася від +14 °С у травні до +21,1 °С у серпні, що створювало стабільні умови для росту рослин. Цей рік відзначався кращим вологозабезпеченням, де за вегетаційний період випало 218,3 мм опадів, причому на період сівби

Таблиця 2

Висота рослин сорго цукрового залежно від удобрення у фазі воскової стиглості (см)

№	Варіант	2023 р.	2024 р.	Середнє за два роки
1	Контроль (обробка водою)	207,3	198,5	202,9
2	$N_{30}P_{30}K_{30}$	211,2	208,4	209,8
3	Блек Джек КС	213,5	210,3	211,9
4	Інтермаг Титан	215,6	212,6	214,1
5	$N_{30}P_{30}K_{30}$ + БЛЕК ДЖЕК КС	217,5	214,3	215,9
6	$N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан	220,4	215,8	218,1

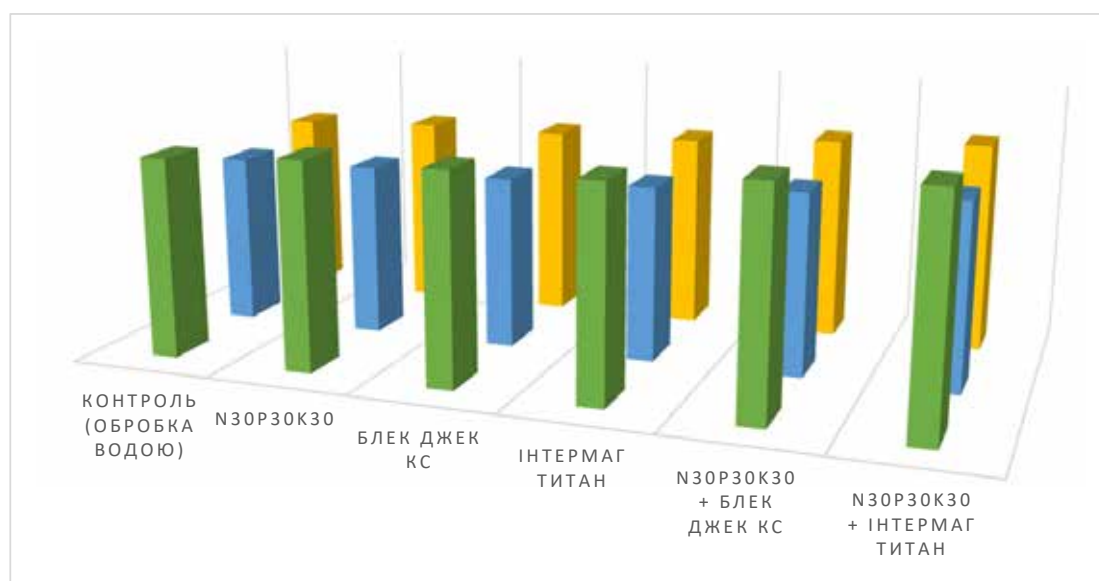


Рис. 1. Густота стояння рослин сорго цукрового у фазу повної стиглості залежно від удобрення, тис. шт. рослин/га

припало 84,0 мм. Це сприяло дружнім сходдам і швидкому розвитку рослин на стадії кущення. Загалом вегетаційний період характеризувався сприятливими умовами: переважала тепла погода, а температурні показники відповідали середньобагаторічній нормі.

Натомість 2024 р. характеризувався дефіцитом опадів, а це призвело до зниження запасів ґрунтової вологи та погіршення умов для росту та розвитку сорго цукрового, оскільки на час сівби випало лише 31 мм, а протягом наступних днів опадів зовсім не спостерігалось. Це негативно вплинуло на появу сходів, густоту стояння рослин, отже, і на врожайність культури.

Встановлено, що на контролі (обробка водою) врожайність зеленої маси сорго цукрового за період досліджень становила 56,2 т/га. Внесення мінеральних добрив у дозі N₃₀P₃₀K₃₀ забезпечило приріст врожайності на 2,2 т/га порівняно з контролем. Використання регулятора росту Блек Джек КС дозволило досягти врожайності 60,2 т/га, що на 6,6% вище за контроль та 3,0% із варіантом внесення мінерального добрива (рис. 2).

Обробка посівів мікродобривом Інтермаг Титан підвищила врожайність до 61,5 т/га, що перевищило контрольний варіант на 5,3 т/га. Максимальний рівень врожайності – 63,2 т/га – було зафіксовано за умов комбінованого застосування добрива N₃₀P₃₀K₃₀ та мікродобрива Інтермаг Титан,

що забезпечило приріст на 11,1% порівняно з контролем. Високий результат також отримано у варіанті спільного використання N₃₀P₃₀K₃₀ і Блек Джек КС – 63,2 т/га.

У дослідженнях О.П. Попової та М.І. Кулика були отримані вищі показники врожайності за вирощування сорго цукрового на чорноземі опідзоленому, де в середньому за роки проведення експерименту в розрізі варіантів дослідження врожайність надземної вегетативної маси варіювала в межах від 82,0 до 97,6 т/га (Попова і Кулик, 2024). У наших дослідженнях врожайність була нижчою, оскільки дерново-підзолистий ґрунт характеризується меншими показниками родючості.

Дослідження показали, що застосування регулятора росту Блек Джек КС сприяло приросту врожайності на рівні 9,8%, тоді як поєднання титановмісного мікродобрива з мінеральним живленням забезпечило підвищення врожайності на 11,1%.

Висновки

У ґрунтово-кліматичних умовах Західного регіону України на дерново-підзолистих ґрунтах застосування мінеральних добрив, регулятора росту та титанового мікродобрива на всіх дослідних варіантах позитивно впливало на ріст і продуктивність сорго цукрового сорту Фаворит. Найвищу врожайність було зафіксовано за комбінованого внесення N₃₀P₃₀K₃₀ з Інтермагом Титан – 63,2 т/га, а також із Блек Джек КС – 62,3 т/га.

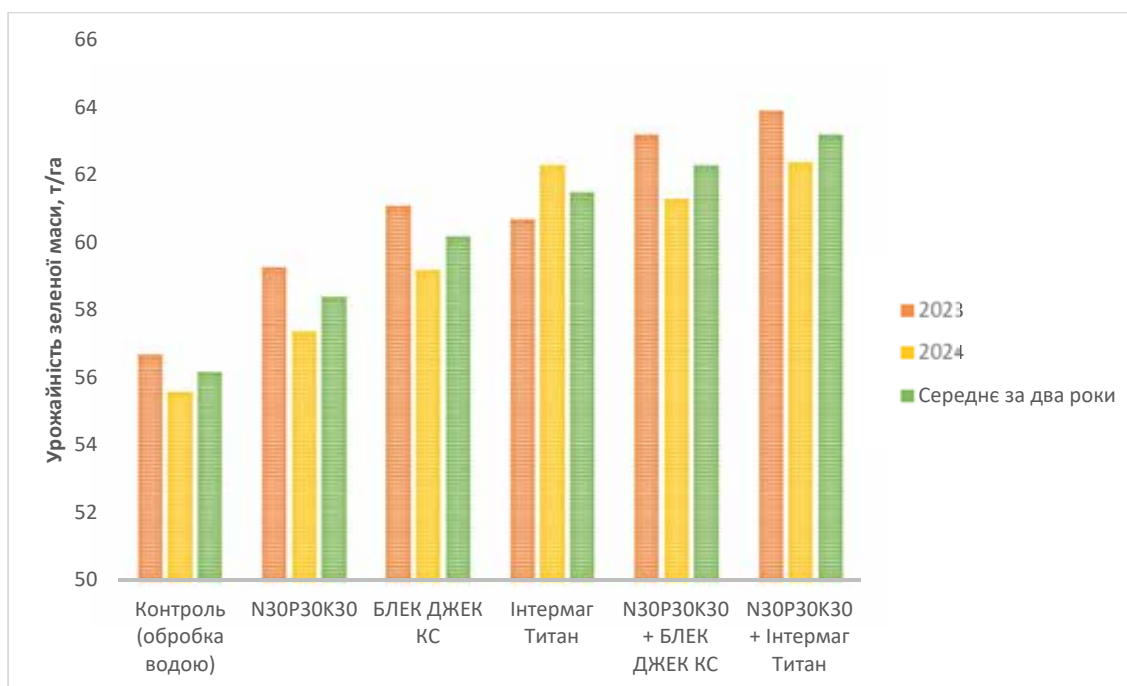


Рис. 2. Урожайність зеленої маси сорго цукрового у фазі молочно-воскової стиглості залежно від удобрення, т/га

Отже, найбільш ефективними схемами удобрення сорго цукрового на зелену масу є ті, що передбачають комплексне застосування мінеральних добрив у поєднанні з гуматними регуляторами росту та титановими мікродобривами.

Список використаної літератури

- Гументик М.Я., Бондар В.С. Цукроносні культури як сировина для виробництва етанолу. *Цукрові буряки*. 2006. № 6. С. 20–21.
- Ганженко О.М. Цукрове сорго. *The Ukrainian Farmer*. 2012. № 10. С. 42–44.
- Дремлюк Г.К., Гамадій В.А., Гамадій І.В. Основні елементи технології вирощування сорго. *Посібник українського хлібороба*. 2013. № 3. С. 274–277.
- Іваніна В.В., Сипко А.О., Стрілець О.П. та ін. Вплив доз добрив на біоенергетичну продуктивність сорго цукрового. *Біоенергетика*. 2021. № 2. С. 21–23. <https://doi.org/10.47414/be.2.2021.244108>.
- Каленська С.М., Гриннюк І.П. Особливості росту і розвитку рослин сорго залежно від видових, сортових особливостей та удобрення культури в умовах Правобережного Лісостепу України. *Збірник наукових праць Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2013. Вип. 17. Т. 1. С. 359–363.
- Ковальчук В.П., Григоренко Н.О., Костенко О.І. Цукрове сорго – цукровмісна сировина та потенційне джерело енергії. *Цукрові буряки*. 2009. № 6. С. 6–7.
- Мулярчук О.І. Технологія вирощування сорго цукрового для виробництва біопалива. *Вісник центру наукового забезпечення агропромислового виробництва Харківській області*. 2016. № 20. С. 54–60.
- Мулярчук О.І., Кобернюк О.Т. Вплив мінерального живлення на вихід біоетанолу сорго цукрового. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2017. № 26. Ч. 1. С. 94–101.
- Олексій Л.М., Буряк І.М. Елементи технології вирощування сорго цукрового для виробництва біоетанолу в умовах Західного Лісостепу. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*. 2020. Вип. 68 (1). С. 146–161.
- Попова О.П., Кулик М.І. Вплив позакореневої обробки посівів на врожайність біомаси сорго цукрового. *Аграрні інновації*. 2024. № 24. С. 123–134. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.24.18>.

Чернова А.В., Коваленко О.А., Корхова М.М. Урожайність зеленої маси сорго цукрового залежно від сортових особливостей, норм висіву, біопрепарату та мікродобрив за різних років дослідження. *Аграрні інновації*. 2020. № 4. С. 136–142. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2020.4.20>.

Ahmed M., Fayyaz-ul-Hassan Asif M. Amelioration of drought in sorghum by Silicon. *Commun. Soil Sci. and Plant Anal.* 2014. Vol. 45. № 4. P. 470–486.

Karbiivska U.M., Hryhoriv Ya.Ya., Sitnyk A.A. Impact of fertilization on the productivity of sugar sorghum in the conditions of the Carpathian. *Topical aspects of modern scientific research : The 4th International scientific and practical conference, December 21–23, 2023. Tokyo, Japan : CPN Publishing Group, 2023. P. 15–19.*

Kurilo V., Marchuk A., Ivanovs S. Impact of agrotechnical methods up on the energetic productivity of sweet sorghum. *Journal of research and applications in agricultural engineering – Poznan.* 2015. № 60 (2). P. 50–53.

References

Humentyk, M.Ya., & Bondar, V.S. (2006). Tsukronosni kultury yak syrovyna dlia vyrobnytstva etanolu [Sugar-bearing crops as raw materials for ethanol production]. *Tsukrovi buriaky [Sugar beets]*, 6, 20–21 [in Ukrainian].

Hanzhenko, O.M. (2012). Tsukrove sorho [Sweet sorghum]. *The Ukrainian Farmer*, 10, 42–44 [in Ukrainian].

Dremluk, H.K., Hamadii, V.L., & Hamadii, I.V. (2013). The main elements of the sorghum cultivation technology [Key Elements of Sorghum Cultivation Technology]. *Posibnyk ukrainskoho khlibo-roba [A Guide for the Ukrainian Farmer]*, 3, 274–277 [in Ukrainian].

Ivanina, V.V., Sypko, A.O., & Strilets, O.P. et al. (2021). Vplyv doz dobryv na bioenerhetychnu produktyvnist sorho tsukrovoho [Effect of fertilizer doses on the bioenergetic productivity of sugar sorghum]. *Bioenerhetyka [Bioenergetics]*, 2, 21–23. <https://doi.org/10.47414/be.2.2021.244108> [in Ukrainian].

Kalenska, S.M., & Hrynniuk, I.P. (2013). Osoblyvosti rostu i rozvytku roslyn sorho zalezno vid vydovkyh, sortovykh osoblyvostei ta udobrennia kultury v umovakh Pravoberezhnoho Lisostepu Ukrainy [Growth and Development Features of Sorghum Plants Depending on Species, Variety Characteristics, and Fertilization in the Conditions of the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine]. *Zb. nauk. prats In-tu bioenerhetychnykh kultur i tsukrovyykh buriakiv [Collected Scientific Works of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beets]*. Vyp. 17. T. 1. 359–363 [in Ukrainian].

Kovalchuk, V.P., Hryhorenko, N.O., & Kostenko, O.I. (2009). Tsukrove sorho – tsukrovnisna syrovyna ta potentsiine dzherelo enerhii [Sweet Sorghum – Sugar-Containing Raw Material and a Potential Energy Source]. *Tsukrovi buriaky, [Sugar Beets]*, 6, 6–7 [in Ukrainian].

Muliarchuk, O.I. (2016). Tekhnolohiia vyroshchuvannia sorho tsukrovoho dlia vyrobnytstva biopalyva [Technology of Sweet Sorghum Cultivation for Biofuel Production]. *Visnyk tsentru naukovooho zabezpechennia APV Kharkivskii oblasti [Bulletin of the Center for Scientific Support of the Agro-Industrial Complex of Kharkiv Region]*, 20, 54–60 [in Ukrainian].

Muliarchuk, O.I., & Koberniuk, O.T. (2017). Vplyv mineralnoho zhyvlennia na vykhid bioetanolu sorho tsukrovoho [Effect of Mineral Nutrition on Bioethanol Yield from Sweet Sorghum]. *Podilskyi visnyk: silske hospodarstvo, tekhnika, ekonomika [Podilian Bulletin: Agriculture, Technology, Economics]*, 26, Ch. 1, 94–101 [in Ukrainian].

Olekshii, L.M., & Buriak, I.M. (2020). Elementy tekhnolohii vyroshchuvannia sorho tsukrovoho dlia vyrobnytstva bioetanolu v umovakh Zakhidnoho Lisostepu [Elements of Sweet Sorghum Cultivation Technology for Bioethanol Production in the Conditions of the Western Forest-Steppe]. *Peredhirne ta hirske zemlerobstvo i tvarynnystvo [Foothill and Mountain Agriculture and Animal Husbandry]*, 68 (1), 146–161 [in Ukrainian].

Popova, O.P., & Kulyk, M.I. (2024). Vplyv pozakorenevoi obrobky posiviv na vrozhaunist biomasy sorho tsukrovoho [Effect of Foliar Treatment on the Biomass Yield of Sweet Sorghum]. *Ahrarni innovatsii [Agrarian Innovations]*, 24, 123–134. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.24.18> [in Ukrainian].

Chernova, A.V., Kovalenko, O.A., & Korkhova, M.M. (2020). Urozhaunist zelenoi masy sorho tsukrovoho zalezno vid sortovykh osoblyvostei, norm vysivu, biopreparatu ta mikrodobryv za riznykh rokiv doslidzhennia [Green Biomass Yield of Sweet Sorghum Depending on Variety Characteristics, Sowing Rates, Biopreparations, and Micronutrients under Different Years of Study]. *Ahrarni inno-*

vatsii [Agrarian Innovations], 4, 136–142. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2020.4.20> [in Ukrainian].

Ahmed, M., & Fayyaz-ul-Hassan, Asif M. (2014). Amelioration of drought in sorghum by Silicon. *Commun. Soil Sci. and Plant Anal.*, Vol. 45, 4, 470–486 [in English].

Karbivska, U.M., Hryhoriv, Ya.Ya., & Sitnyk, A.A. (2023). Impact of fertilization on the productivity of sugar sorghum in the conditions of the Carpathian. The 4th International scientific and practical conference “Topical aspects of modern scientific research” (December 21–23, 2023) CPN Publishing Group, Tokyo, Japan. 15–19 [in English].

Kurilo, V., Marchuk, A., & Ivanovs, S. (2015). Impact of agrotechnical methods up on the energetic productivity of sweet sorghum. *Journal of research and applications in agricultural engineering – Poznan*, 60 (2), 50–53 [in English].

Отримано: 25.04.2025

Прийнято: 15.05.2025



УДК 633.854.78:631.8(477.83/.86)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.24>

ПРОДУКТИВНІСТЬ СОНЯШНИКУ ЗАЛЕЖНО ВІД СИСТЕМИ УДОБРЕННЯ В УМОВАХ ЗАХІДНОГО РЕГІОНУ УКРАЇНИ

Р. О. Турак¹

У статті подано результати дослідження впливу різних систем удобрення на продуктивність соняшнику в умовах Західного регіону України. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення ефективності вирощування соняшнику як однієї із провідних олійних культур у контексті збереження родючості ґрунтів і раціонального використання добрив. Специфічні кліматичні умови Західного регіону потребують регіоналізованого підходу до розроблення технологій удобрення.

Метою проведеної роботи було встановлення ефективності різних систем удобрення щодо формування врожайності соняшнику, а також оцінювання агробіологічних показників росту й розвитку рослин залежно від умов живлення.

Дослідження виконували з використанням методів порівняльно-аналітичного, експериментального та розрахункового аналізу. Польовий дослід проводився на опідзоленому чорноземі легкосуглинкового гранулометричного складу, типового для агроландшафтів Придністровської агропромислової зони Івано-Франківської області, із дотриманням загальноприйнятої агротехніки регіону.

Попередником слугувала озима пшениця.

За результатами досліджень встановлено, що найбільшу врожайність забезпечувала комбінована система удобрення, яка поєднувала внесення мінеральних добрив із використанням біологічних препаратів і побічної продукції попередника. Такий інтегрований підхід позитивно впливав на морфометричні показники рослин, зокрема на збільшення діаметра кошика, кількість насіння та маси насіння. Окрім того, спостерігалось підвищення стійкості рослин до несприятливих умов середовища, що є особливо важливим у контексті змін клімату.

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості адаптації систем удобрення до конкретних ґрунтово-кліматичних умов Західного регіону з метою оптимізації технологій вирощування соняшнику, підвищення ефективності агропромисловництва та забезпечення стабільної врожайності олійних культур.

Ключові слова: соняшник, продуктивність, система удобрення, врожайність, Західний регіон України.

¹ аспірант кафедри лісового і аграрного менеджменту
(Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ)
e-mail: roman.turak.19@pnu.edu.ua
ORCID: 0009-0005-6959-6310

SUNFLOWER PRODUCTIVITY DEPENDING ON FERTILISATION SYSTEM IN THE WESTERN REGION OF UKRAINE

R. O. Turak

The article presents the results of a study on the impact of different fertilization systems on sunflower productivity under the conditions of the Western region of Ukraine. The relevance of the study is determined by the need to increase the efficiency of sunflower cultivation as one of the leading oilseed crops, in the context of maintaining soil fertility and rational use of fertilizers. The specific climatic conditions of the Western region require a regionalized approach to the development of fertilization technologies.

The aim of the study was to determine the effectiveness of various fertilization systems in forming sunflower yield, as well as to evaluate the agrobiological indicators of plant growth and development depending on the nutritional regime.

The research was carried out using comparative-analytical, experimental, and calculation methods.

The field trial was conducted on podzolic chernozem with light loamy texture, which is typical for the agro-landscapes of the Dniester agri-production zone of Ivano-Frankivsk region, in compliance with the region's standard agronomic practices. Winter wheat served as the preceding crop.

The results showed that the highest yield was provided by a combined fertilization system, which integrated the application of mineral fertilizers with biological preparations and by-products of the preceding crop. This integrated approach positively influenced plant morphometric indicators, particularly increasing head diameter, seed number, and seed weight. Additionally, improved plant resistance to adverse environmental conditions was observed, which is especially important in the context of climate change.

The practical significance of the obtained results lies in the potential to adapt fertilization systems to the specific soil and climatic conditions of the Western region, with the aim of optimizing sunflower cultivation technologies, improving agro-industrial efficiency, and ensuring stable yields of oilseed crops.

Key words: sunflower, productivity, fertilization system, yield, Western region of Ukraine.

Вступ

Соняшник є однією із ключових сільсько-господарських культур в Україні та важливим джерелом рослинної олії як на внутрішньому, так і на світовому ринку. За обсягами посівних площ і валового збору насіння Україна стабільно входить до числа світових лідерів. Зростання площ, відведених під цю культуру, зумовлене низкою чинників, серед яких такі: удосконалення технологій вирощування, відносно низька собівартість виробництва, висока рентабельність та інші економічні переваги (Адаменко, 2005; Ткачук і Бондарук, 2023).

Натепер соняшник має великий попит в Україні. За останні двадцять років площі під цією культурою зросли більш ніж утричі, досягнувши 5,2 мільйона гектарів. Це зростання зумовлене не лише розширенням посівних площ і географії вирощування, а й активним упровадженням сучасних технологій, що сприяло підвищенню середньої врожайності в основних регіонах вирощування з 9–10 до 18–19 центнерів з гектара (Ткачук і Овчарук, 2020).

Соняшник залишається однією із провідних і економічно вигідних культур сучасного сільського господарства України, утримує вагоме місце серед світових лідерів із

виробництва й експорту. Збільшення посівних площ разом із розвитком аграрного сектору сприяли зростанню загального обсягу виробництва цієї культури (Каленська та ін., 2020; Курач та ін., 2023).

Соняшник посідає провідне місце серед олійних культур в агропромисловому комплексі України. Його значення постійно зростає через підвищений попит на соняшникову олію, яка широко застосовується як у харчовій, так і в технічній промисловості. Побічні продукти переробки соняшнику також мають цінність, оскільки використовуються для годівлі сільськогосподарських тварин (Димитров, 2015; Карбівська і Турак, 2024).

Агробіологічні особливості соняшнику дозволяють вирощувати його в різних ґрунтово-кліматичних умовах, однак для досягнення високих показників урожайності та якості продукції необхідне оптимальне забезпечення рослин елементами мінерального живлення.

Результати попередніх агрономічних досліджень підтверджують, що ефективна система удобрення здатна не лише підвищити врожайність, а й покращити агрохімічні показники ґрунту, сприяти сталому землеробству (Кириченко та ін., 2023).

Водночас специфічні кліматичні умови Західного регіону потребують розумного підходу до розроблення технологій удобрення, що обґрунтовує актуальність даної роботи.

Завдяки науковим розробкам і дослідженням учених із різних регіонів України, зокрема С.М. Каленської, О.І.Полякова, М.І.Федорчука, О.А.Єременка, Е.М. Горбатюка та інших, було вирішено чимало технологічних завдань, що забезпечило ефективне використання біологічного потенціалу соняшнику (Єременко, 2017; Каленська та ін., 2020; Мазур та ін., 2020; Кириченко та ін., 2023). Сучасні гібриди соняшнику характеризуються різною тривалістю вегетаційного періоду, високою стійкістю до захворювань, значним генетичним потенціалом урожайності, адаптивністю до умов вирощування та витривалістю до стресових впливів. Водночас важливу роль відіграє вдосконалення основних елементів технології вирощування, які сприяють повнішій реалізації цього потенціалу. До таких чинників, зокрема, належать оптимальні строки сівби для визначеної кліматичної зони та вибір ширини міжрядь (Ковіхін, 2016; Пінковський, 2019; Міхеєв і Молоков, 2019).

Одним зі шляхів підвищення ефективності вирощування соняшнику є впровадження сучасних технологій виробництва, орієнтованих на екологічну безпеку та сталий розвиток (Ткаліч та ін., 2018; Ткачук і Овчарук, 2020; Цилюрик та ін., 2022; Ткачук і Бондарук, 2023).

Забезпечення стабільно високої продуктивності агроєкосистем за умов обмеженої кількості техногенних ресурсів потребує їх часткової компенсації шляхом використання нетоварної продукції в системі удобрення сільськогосподарських культур (Домарацький і Добровольський, 2017). Результати досліджень свідчать, що внесення мінеральних добрив позитивно впливає на врожайність і якість насіння соняшнику, сприяє формуванню врожаю на рівні 3,5–4,5 т/га з високим вмістом олії – 49–52% (Фурманець та ін., 2024). В умовах сучасного агровиробництва реалізація максимального продуктивного потенціалу соняшнику можлива лише за дотримання всіх агротехнічних заходів, адаптованих до конкретного регіону. Тому важливо дослідити вплив агротехнічних чинників на формування врожаю цієї культури.

Мета дослідження – оцінити врожайність гібридів соняшнику залежно від застосова-

них систем удобрення в умовах Західного регіону України.

Матеріал і методи

Продуктивність соняшнику різних груп стиглості та визначення найефективніших гібридів за умов застосування різних систем удобрення вивчали в рамках короткотривалого виробничого експерименту, проведеного у 2024 р. на базі фермерського господарства «Поточище», яке розташоване на території Коломийської ОТГ Івано-Франківської області.

Дослідження проводили на опідзоленому легкосуглинковому чорноземі, що характеризувався такими агрохімічними показниками: вміст гумусу – 3,81%; вміст лужногідролізованого азоту – 104–119 мг/кг ґрунту; концентрація рухомого фосфору – 136–150мг/кг; рухомогокалію–179–201мг/кг; рівень кислотності (рН сол.) – 6,5.

Польовий дослід було закладено за схемою випадкової рендомізації із чотирма повтореннями кожного варіанту. У структурі дослідження передбачалося вивчення дії двох основних чинників (табл. 1), що дозволило оцінити їхній вплив на продуктивність культури в конкретних ґрунтово-кліматичних умовах регіону.

Таблиця 1

Схема дослідів

Фактор А – гібриди	Фактор В – добрива
Вольф Бельведер Конді Арізона	контроль (без добрив)
	N ₅₀ P ₄₀ K ₅₀
	N ₅₀ P ₄₀ K ₅₀ + біопрепарат
	N ₅₀ P ₄₀ K ₅₀ + П. П.*
	N ₅₀ P ₄₀ K ₅₀ +біопрепарат + П. П.

Примітка. П. П.* – побічна продукція попередника; біопрепарат – Фреш Енергія.

У процесі дослідження застосовували методи: порівняльно-аналітичний, експериментальний і розрахунковий. Технологія вирощування культури відповідала загальноприйнятим агротехнічним вимогам для даної природно-кліматичної зони, за винятком елементів, що змінювалися відповідно до умов дослідів. Попередньою культурою на дослідній ділянці була озима пшениця.

Результати та обговорення

У результаті проведених досліджень встановлено значну варіативність морфометричних показників соняшнику залежно від застосованої системи удобрення та генотипу

гібридів. Аналіз діаметра кошика показав, що за всіх варіантів удобрення найбільші показники були зафіксовані в гібрида Конді – від 21,7 см на контролі до 23,8 см за поєднаного внесення $N_{50}P_{40}K_{50}$ із біопрепаратом і побічної продукції попередньої культури. Подібну позитивну динаміку продемонстрував і гібрид Вольф, у якого діаметр кошика зростав із 18,2 см (контроль) до 23,1 см за найінтенсивнішої системи удобрення (табл. 2).

Гібриди Бельведер і Арізона характеризувались меншими абсолютними значеннями діаметра кошика, проте і для них спостерігалось зростання цього показника на фоні застосування добрив. Зокрема, у гібрида Арізона показник збільшився із 14,9 до 18,4 см, що свідчить про позитивну реакцію навіть у відносно слабших за цим параметром гібридів.

Маса насіння з одного кошика змінювалася під впливом системи живлення. Найвищі значення були притаманні гібриду

Вольф – 77,7 г за умови застосування комплексного варіанту удобрення ($N_{50}P_{40}K_{50}$ + біопрепарат + П. П.), що перевищувало контрольний варіант на 10,2 г. Гібрид Конді за цим параметром також продемонстрував позитивну реакцію на мінеральне та біологічне удобрення: із 62,5 г у контрольному варіанті до 69,0 г у найінтенсивнішій системі удобрення. Бельведер і Арізона показали нижчі абсолютні значення маси насіння, однак і для них спостерігалось суттєве зростання цього показника у результаті внесення мінерального живлення. Так, у Бельведера маса насіння з кошика зростає із 47,5 до 68,9 г, а в Арізони – із 43,6 до 68,8 г, що свідчить про високу ефективність комплексного удобрення навіть у менш урожайних гібридів.

Маса 1 000 насінин є одним із ключових показників якості посівного матеріалу, а також має тісний зв'язок із біологічною продуктивністю культури. У цьому аспекті найвищі показники спостеріга-

Таблиця 2

Елементи структури гібридів соняшнику залежно від удобрення

Гібриди	Система удобрення	Діаметр кошика, см	Маса насіння з одного кошика, г	Маса 1 000 насінини, г
Вольф	Контроль (без добрив)	18,2	67,5	58,2
	$N_{50}P_{40}K_{50}$	21,4	68,9	64,4
	$N_{50}P_{40}K_{50}$ + біопрепарат	22,2	76,7	62,4
	$N_{50}P_{40}K_{50}$ + П. П.	22,2	77,0	61,5
	$N_{50}P_{40}K_{50}$ + біопрепарат + П. П.	23,1	77,7	63,7
Бельведер	Контроль (без добрив)	16,3	47,5	55,8
	$N_{50}P_{40}K_{50}$	16,8	55,2	54,3
	$N_{50}P_{40}K_{50}$ + біопрепарат	17,0	67,8	57,0
	$N_{50}P_{40}K_{50}$ + П. П.	17,4	65,4	57,4
	$N_{50}P_{40}K_{50}$ + біопрепарат + П. П.	17,4	68,9	60,1
Конді	Контроль (без добрив)	21,7	62,5	56,6
	$N_{50}P_{40}K_{50}$	22,5	63,7	58,2
	$N_{50}P_{40}K_{50}$ + біопрепарат	23,0	66,9	60,5
	$N_{50}P_{40}K_{50}$ + П. П.	23,1	64,8	59,1
	$N_{50}P_{40}K_{50}$ + біопрепарат + П. П.	23,8	69,0	62,3
Арізона	Контроль (без добрив)	14,9	43,6	48,5
	$N_{50}P_{40}K_{50}$	16,6	57,2	52,7
	$N_{50}P_{40}K_{50}$ + біопрепарат	17,3	64,0	61,9
	$N_{50}P_{40}K_{50}$ + П. П.	17,9	62,5	59,3
	$N_{50}P_{40}K_{50}$ + біопрепарат + П. П.	18,4	68,8	63,0

лися в гібрида Вольф – 63,7 г на фоні повного удобрення, що на 5,5 г перевищувало контроль. Конді також продемонстрував зростання маси 1 000 насінин від 56,6 до 62,3 г, що підтверджує його генетичну здатність формувати велику насінину за сприятливих умов мінерального живлення. Арізона, яка на контролі мала найнижчий показник (48,5 г), у разі застосування повного комплексу добрив досягла 63,0 г, продемонструвавши найбільший приріст серед усіх гібридів (на 14,5 г). Це може свідчити про потенціал гібрида за умов комплексної системи живлення. У Бельведера показники маси 1 000 насінин коливалися від 55,8 до 60,1 г, що свідчить про стабільність ознаки з незначним приростом навіть за інтенсивного удобрення.

Загалом, за результатами досліджень можна зробити висновок, що застосування мінерального удобрення в поєднанні з біологічними препаратами та другорядною продукцією попередньої культури сприяє суттєвому підвищенню структурних показників продуктивності в усіх досліджуваних гібридів. Найбільш позитивну реакцію на удобрення продемонстрували гібриди Вольф і Конді, які відзначались вищими абсолютними значеннями як діаметра кошика, так і маси насіння. Гібриди Арізона та Бельведер, попри нижчі вихідні показники, виявили значну чутливість до удобрення, що дозволяє рекомендувати їх для вирощування в зоні Західного

Лісостепу України за умови інтенсивного застосування агротехнологій.

Найвищу врожайність у середньому за період дослідження забезпечив гібрид Вольф, який на варіанті з комплексним удобренням (мінеральні добрива + біопрепарат + П. П.) сформував урожайність на рівні 4,45 т/га, що на 36,4% перевищувало контроль (рис. 1). Аналогічну тенденцію спостерігали для інших варіантів удобрення цього гібрида, зокрема, у разі застосування лише мінеральних добрив урожайність становила 3,75 т/га, а за їх поєднання з біопрепаратом – 4,08 т/га, що відповідно на 24,5 і 30,6% перевищувало контрольний варіант.

Урожайність гібрида Бельведер зросла із 2,17 т/га у контрольному варіанті до 4,36 т/га на фоні повного удобрення, що відповідало приросту 50,2%. Застосування лише мінеральних добрив забезпечило 38,8% приросту, а комбінація добрив із біологічними препаратами – до 47,2%. Такі результати свідчать про високу чутливість гібрида до підвищення рівня живлення, що робить його придатним для інтенсивних технологій вирощування.

Гібрид Конді характеризувався меншою, порівняно з попередніми, урожайністю на контролі (2,61 т/га), однак за умов застосування повного комплексу добрив урожайність зросла до 4,32 т/га, що на 39,6% вище за контроль. Помітне підвищення врожайності спостерігалося і в інших варіантах удобрення:

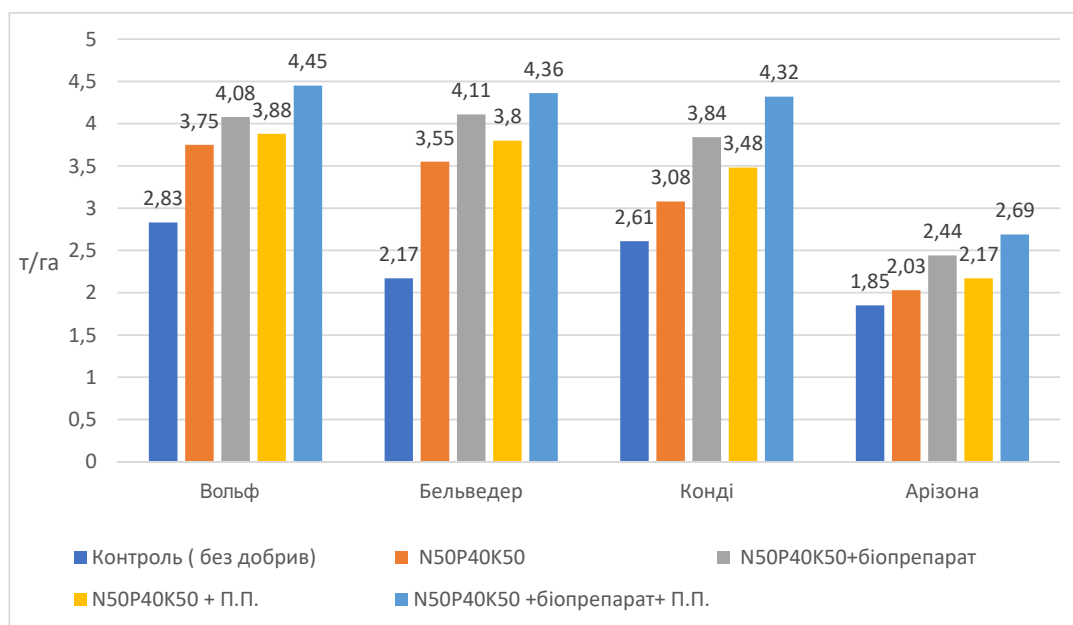


Рис. 1. Урожайність гібридів соняшнику, т/га

за додавання біопрепарату – 3,84 т/га (+32,0%), а за використання лише мінеральних добрив – 3,08 т/га (+15,3%). Це підтверджує значну залежність даного гібрида від рівня агротехнічного забезпечення.

Найменшу врожайність на контрольному варіанті (1,85 т/га) продемонстрував гібрид Арізона. Проте він також позитивно реагував на застосування удобрення. Так, на варіанті з повним комплексом добрив урожайність сягнула 2,69 т/га, що становить 31,2% приросту. Використання лише мінеральних добрив сприяло приросту на 8,9%, тоді як комбінація з біопрепаратом забезпечила 24,2%. Отже, хоча потенціал урожайності Арізони був нижчим, ефективність реакції на агрофон залишалась високою.

Такі результати підтверджують доцільність інтегрованого підходу до живлення соняшнику, зокрема у виробничих умовах Західного Лісостепу України.

Висновки

Застосування мінерального удобрення $N_{50}P_{40}K_{50}$ як окремо, так і в поєднанні з біопрепаратами та побічною продукцією попередника сприяє стабільному та значному підвищенню врожайності. Найвищу врожайність у середньому за період дослідження забезпечив гібрид Вольф, який на варіанті з комплексним удобренням (мінеральні добрива + біопрепарат + П. П.) сформував урожайність на рівні 4,45 т/га, що на 36,4% перевищувало контроль, гібрид Бельведер – 4,36 т/га.

Список використаної літератури

- Адаменко Т.І. Перспективи виробництва соняшнику в Україні в умовах зміни клімату. *Агроном*. 2005. № 1. С. 102–103.
- Димитров С.Г. Формування продуктивності гібридів соняшнику залежно від елементів технології вирощування. *Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2015. Вип. 23. С. 19–23.
- Домарацький Є.О., Добровольський А.В. Особливості водоспоживання соняшника за різних умов мінерального живлення. *Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2017. № 1 (65). С. 51–56. URL: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Dopovidi/article/view/8117> (дата звернення: 10.03.2025).
- Єременко О.А. Продуктивність соняшнику залежно від мінерального живлення та передпосівної обробки насіння за умов недостатнього зволоження. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2017. № 3. С. 25–30.
- Каленська С.М., Гарбар Л.А., Горбатюк Е.М. Роль регламентів сівби у формуванні фітотетричних показників соняшнику. *Таврійський науковий вісник*. 2020. № 113. С. 49–55.
- Каленська С.М., Присяжнюк О.І., Мокрієнко В.А. Пластичність урожайності гібридів соняшнику в умовах Лівобережного Лісостепу України. *Plant Varieties Studying and Protection*. 2020. V. 16. № 4. Р. 402–406. <https://doi.org/10.21498/2518-1017.16.4.2020.224058>.
- Карбівська У.М., Турак Р.О. Вплив строків посіву на продуктивність соняшнику в умовах Прикарпаття. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 7. С. 141–147. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.7.2024.15>.
- Кириченко В.В., Макляк К.М., Леонова Н.М., Коломацька В.П., Леонов О.Ю., Шепілов Б.П. Особливості технології вирощування гібридів соняшнику кондитерського типу в умовах східної частини Лісостепу України. *Вісник аграрної науки*. 2023. № 1 (898). С. 14–21.
- Ковіхін С.В. Вплив густоти стояння рослин та удобрення на формування продуктивності гібридів соняшнику в умовах Півдня України. *Таврійський науковий вісник*. Херсон : Д.С. Грін, 2016. Вип. 96. С. 74–79.
- Курач О.В., Лукашук Я.Я., Пермута В.В. Вплив доз мінерального удобрення та симуляторів росту на продуктивність гібридів соняшнику. *Вісник аграрної науки*. 2023. № 8 (845). С. 12–19.
- Мазур В.А., Дідур І.М., Циганський В.І., Маламура С.В. Формування продуктивності гібридів соняшнику залежно від рівня удобрення та умов зволоження. *Сільське господарство та лісівництво*. 2020. № 19. С. 208–220.
- Міхеев В.Г., Молоков А.В. Продуктивність соняшнику залежно від строків сівби. *Вісник Харківського національного аграрного університету*. 2019. № 1. С. 57–65.
- Піньковський Г.В. Ріст, розвиток та продуктивність рослин соняшнику залежно від строків сівби та густоти стояння у правобережному Степу України. *Таврійський науковий вісник*. 2019. № 108. С. 78–85.
- Ткаліч І.Д., Гирка А.Д., Бочевар О.В., Ткаліч Ю.І. Агротехнічні заходи підвищення урожайності насіння соняшника в умовах степу України. *Зернові культури*. 2018. Т. 2. № 1. С. 44–52.

Ткачук О.П., Бондарук Н.В. Фактори інтенсифікації та екологізації вирощування соняшнику. *Аграрні інновації*. 2023. № 18. С. 120–127.

Ткачук О.П., Овчарук В.В. Потенціал біомаси побічної продукції рослинництва для удобрення ґрунту. Scientific achievements of modern society. Abstracts of IX international scientific and practical conference, April 28–30, 2020, Liverpool. P. 1069–1076.

Фурманець М.Г., Фурманець Ю.С., Фурманець І.Ю. Вплив систем обробітку ґрунту та удобрення на вологозабезпеченість та продуктивність соняшнику в західному Лісостепу України. *Зернові культури*. 2024. Т. 8. № 2. С. 342–349. <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0348>.

Циліурік О.І., Румбах М.Ю., Іжболдін О.О., Бондаренко О.В. Вплив регуляторів росту на ріст і розвиток рослин соняшнику в Північному Степу України. *Зернові культури*. 2022. Т. 6. № 1. С. 69–81.

References

Adamenko, T.I. (2005). Perspektyvy vyrobnytstva soniashnyku v Ukraini v umovakh zminy klimatu [Prospects for Sunflower Production in Ukraine under Climate Change Conditions]. *Ahronom [Agronomist]*, 1, 102–103 [in Ukrainian].

Dymytrov, S.H. (2015). Formuvannia produktyvnosti hibrydiv soniashnyku zalezhno vid elementiv tekhnolohii vyroshchuvannia [Formation of sunflower hybrid productivity depending on cultivation technology elements]. *Naukovi pratsi Instytutu bioenerhetychnykh kultur i tsukrovyykh buriakiv [Scientific works of the Institute of bioenergy crops and sugar beet]*, 23, 19–23 [in Ukrainian].

Domaratskyi, Ye.O., & Dobrovolskyi, A.V. (2017). Osoblyvosti vodospozhyvannya sonyashnyka za riznykh umov mineral'noho zhyvlennya [Features of sunflower w6ater consumption under different conditions of mineral nutrition]. *Naukovi dopovidi NUBiP Ukrainy [Scientific reposts of National university of life resources an environmental management]*, 1 (65). 51–56. [Electronic resource] URL: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Dopovidi/article/view/8117> (access date 10.03.2025) [in Ukrainian].

Yeremenko, O.A. (2017). Produktyvnist soniashnyku zalezhno vid mineralnoho zhyvlennia ta peredposivnoi obrobky nasinnia za umov nedostatnoho zvolozhennia [Productivity of sunflower depending on mineral nutrition and pre-sowing seed treatment under conditions of insufficient moisture]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii [Bulletin of the Poltava state agrarian academy]*, 3, 25–30 [in Ukrainian].

Kalenska, S.M., Harbar, L.A., & Horbatiuk, E.M. (2020). Rol rehlamentiv sivby u formuvanni fitometrychnykh pokaznykiv soniashnyku [The role of sowing regulations in shaping the phytometric indicators of sunflower]. *Tavriiskyi naukovi visnyk [Taurian scientific herald]*, 113, 49–55 [in Ukrainian].

Kalenska, S.M., Prysiazhniuk, O.I., & Mokriienko, V.A. (2020). Plastychnist urozhainosti hibrydiv soniashnyku v umovakh Livoberezhnoho Lisostepu Ukrainy [The plasticity of sunflower hybrid yields in the conditions of the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine]. *Plant Varieties Studying and Protection*, 16(4), 402–406 [in Ukrainian].

Karbiivska, U.M., & Turak, R.O. (2024). Vplyv strokiv posivu na produktyvnist soniashnyku v umovakh Prykarpattia [The Influence of Sowing Dates on Sunflower Productivity in the Pre-Carpathian Region]. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychyykh nauk [Ukrainian Journal of Natural Sciences]*, 7, 141–147. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.7.2024.15> [in Ukrainian].

Kyrychenko, V.V., Makliak, K.M., Leonova, N.M., Kolomatska, V.P., Leonov, O.Iu., & Shepilov, B.P. (2023). Osoblyvosti tekhnolohii vyroshchuvannia hibrydiv soniashnyku kondyterskoho typu v umovakh skhidnoi chastyny Lisostepu Ukrainy [Features of the cultivation technology of confectionery-type sunflower hybrids in the conditions of the eastern part of the Forest-Steppe of Ukraine]. *Visnyk ahrarnoi nauky [Herald of Agricultural Sciences]*, 1 (898), 14–21 [in Ukrainian].

Kovikhin, S.V. (2016). Vplyv hustoty stoiannia roslyn ta udobrennia na formuvannia produktyvnosti hibrydiv soniashnyku v umovakh Pivdnia Ukrainy [The impact of plant stand density and fertilization on the formation of sunflower hybrid productivity in the conditions of Southern Ukraine]. *Tavriiskyi naukovi visnyk [Tavriya Scientific Bulletin]*, 96, 74–79 [in Ukrainian].

Kurach, O.V., Lukashuk, Ya.Ia., & Permuta, V.V. (2023). Vplyv doz mineralnoho udobrennia ta symulatoriv rostu na produktyvnist hibrydiv soniashnyku [The influence of doses of mineral fertilization and growth stimulators on the productivity of sunflower hybrids]. *Visnyk ahrarnoi nauky [Herald of Agricultural Sciences]*, 8 (845), 12–19 [in Ukrainian].

- Mazur, V.A., Didur, I.M., Tsyhanskyi, V.I., & Malamura, S.V. (2020). Formuvannia produktyvnosti hibrydiv soniashnyku zalezno vid rivnia udobrennia ta umov zvolozhennia [Formation of sunflower hybrid productivity depending on the level of fertilization and moisture conditions]. *Silske hospodarstvo ta lisivnytstvo [Agriculture and Forestry]*, 19, 208–220 [in Ukrainian].
- Mikheiev, V.H., & Molokov, A.V. (2019). Produktivnist soniashnyku zalezno vid strokiv sivy [Sunflower productivity depending on sowing dates.]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho ahromoho universytetu [Bulletin of Kharkiv National Agrarian University]*, 1, 57–65 [in Ukrainian].
- Pinkovskyi, H.V. (2019). Rist, rozvytok ta produktyvnist roslyn soniashnyku zalezno vid strokiv sivy ta hustoty stoiannia v pravoberezhnomu Stepu Ukrainy [Growth, development, and productivity of sunflower plants depending on sowing dates and plant density in the Right-Bank Steppe of Ukraine]. *Tavriiskyi naukovi visnyk [Tavriya Scientific Bulletin]*, 108, 78–85 [in Ukrainian].
- Tkalich, I.D., Hyrka, A.D., Bochevar, O.V., & Tkalich, Yu.I. (2018). Ahrotekhnichni zakhody pidvyshchennia urozhaivosti nasinnia soniashnyka v umovakh stepu Ukrainy [Agrotechnical measures to increase sunflower seed yield in the conditions of the Ukrainian steppe]. *Zernovi kultury [Cereal Crops]*, 2(1), 44–52 [in Ukrainian].
- Tkachuk, O.P., & Bondaruk, N.V. (2023). Faktory intensyfikatsii ta ekolohizatsii vyroshchuvannia soniashnyku [Factors of intensification and ecological aspects in sunflower cultivation]. *Ahrarni innovatsii [Agrarian Innovations]*, 18, 120–127 [in Ukrainian].
- Tkachuk, O.P., & Ovcharuk, V.V. (2020). Potentsial biomasy pobichnoi produktsii roslynnytstva dlia udobrennia gruntu [Potential of crop by-products biomass for soil fertilization]. Scientific achievements of modern society [Abstracts of IX international scientific and practical conference, April 28–30, Liverpool], 1069–1076 [in Ukrainian].
- Furmanets, M.H., Furmanets, Yu.S., & Furmanets, I.Yu. (2024). Vplyv system obrobittu gruntu ta udobrennia na volohozabezpechenist ta produktyvnist soniashnyku v zachidnomu Lisostepu Ukrainy [The influence of tillage and fertilization systems on moisture availability and productivity of sunflower in the Western Forest-Steppe of Ukraine]. *Zernovi kultury [Cereal Crops]*, 8(2), 342–349. <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0348> [in Ukrainian].
- Tsyliuryk, O.I., Rumbakh, M.Iu., Izboldin, O.O., & Bondarenko, O.V. (2022). Vplyv rehulatoriv rostu na rist i rozvytok roslyn soniashnyku v Pivnichnomu Stepu Ukrainy [Influence of growth regulators on the growth and development of sunflower plants in the Northern Steppe of Ukraine]. *Zernovi kultury [Cereal Crops]*, 6(1), 69–81 [in Ukrainian].

Отримано: 25.04.2025
Прийнято: 15.05.2025



УДК 633.15:631.8(477.83)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.25>

ПРОДУКТИВНІСТЬ ГІБРИДІВ КУКУРУДЗИ ЗАЛЕЖНО ВІД СИСТЕМИ УДОБРЕННЯ В ЗАХІДНОМУ РЕГІОНІ УКРАЇНИ

Ю. О. Турак¹, Я. Я. Григорів²

Добір гібридів кукурудзи, адаптованих до конкретних умов вирощування, є важливою умовою для реалізації їхнього біологічного потенціалу врожайності. У сучасних аграрних умовах підвищення продуктивності кукурудзи неможливе без урахування впливу агрокліматичних чинників, властивих окремому регіону, а також без оптимізації систем живлення рослин. Метою нашого дослідження було встановлення впливу різних систем удобрення на продуктивність гібридів кукурудзи в умовах Західного регіону України з урахуванням кліматичних особливостей зони, з метою оптимізації елементів живлення для забезпечення високої врожайності.

Для досягнення поставленої мети було проведено польові дослідження, які включали фенологічні спостереження за фазами розвитку кукурудзи, структурний аналіз урожаю та оцінювання ефективності мінерального живлення. У результаті встановлено, що азотні добрива суттєво впливають на подовження міжфазних періодів «сходи – цвітіння волоті» та «цвітіння – молочна стиглість зерна», тим самим збільшують загальну тривалість вегетаційного періоду, що позитивно корелює з рівнем урожайності. Найбільш виражений ефект було зафіксовано в результаті використання добрива КАС-32, а також за комбінованого застосування Карбаміду + КАС.

Максимальні показники врожайності отримано в гібрида ДКС 4897 за найбільш насиченого варіанту удобрення фон $N_{50}P_{40}K_{40}$ і комбінованому застосуванні Карбаміду + КАС дозою 150 кг/га. (B5): 15,6 т/га, маса зерна з одного качана – 133 г, маса 1 000 зерен – 295 г.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості розроблення диференційованих агротехнологій вирощування кукурудзи, що враховують не лише агрохімічну характеристику ґрунтів, а й специфіку кліматичних умов Західного регіону України. Запропонований підхід дозволяє не тільки підвищити рівень урожайності, а й забезпечити стабільність виробництва зерна кукурудзи в умовах змін клімату та ресурсних обмежень.

Ключові слова: азотне живлення, гібриди кукурудзи, вегетаційний період, урожайність, агротехнологія, структура врожаю, Західний регіон.

¹ аспірант кафедри лісового і аграрного менеджменту
(Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ)
e-mail: yurii.turak.23@pnu.edu.ua
ORCID: 0009-0002-3388-8723

² кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри лісового і аграрного менеджменту
(Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ)
e-mail: slava.hryhoriv@pnu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-5892-9483

PRODUCTIVITY OF MAIZE HYBRIDS DEPENDING ON FERTILIZATION SYSTEM IN WESTERN REGION OF UKRAINE

Yu. O. Turak, Ya. Ya. Hryhoriv

Selection of maize hybrids adapted to specific growing conditions is an important condition for realising their biological yield potential. In today's agricultural environment, increasing corn productivity is impossible without taking into account the impact of agro-climatic factors specific to a particular region, as well as optimising plant nutrition systems. The aim of our study was to determine the effect of different fertilisation systems on the productivity of maize hybrids in the Western region of Ukraine, taking into account the climatic characteristics of the zone, in order to optimise nutrients to ensure high yields.

To achieve this goal, field studies were conducted, including phenological observations of the corn development stages, structural analysis of the crop and evaluation of the effectiveness of mineral nutrition. As a result, it was found that nitrogen fertilisers have a significant impact on the extension of the interphase periods "germination – panicle flowering" and "flowering – milk ripeness of grain", thereby increasing the overall length of the growing season, which positively correlates with the level of yield. The most pronounced effect was recorded when using UAN-32 fertiliser, as well as the combined application of Urea + UAN.

The maximum yields were obtained in the DKC 4897 hybrid with the most saturated fertiliser of $N_{50}P_{40}K_{40}$ combined with the use of Urea + UAN at a rate of 150 kg/ha variant (B5): 15,6 t/ha, grain weight per cob – 133 g, weight of 1 000 grains – 295 g.

The practical significance of the results obtained is the possibility of developing differentiated agrotechnologies for maize cultivation, taking into account not only the agrochemical characteristics of soils, but also the specific climatic conditions of the Western region of Ukraine. The proposed approach allows not only to increase the level of yield, but also to ensure the stability of corn production in the face of climate change and resource constraints.

Key words: *nitrogen nutrition, maize hybrids, vegetation period, yield, agrotechnology, yield structure, western region.*

Вступ

У світовому землеробстві кукурудза охоплює приблизно 130 млн га, а загальний валовий збір зерна перевищує 470 млн тонн. Найбільші площі посіву цієї культури зосереджені у США – приблизно 30 млн га, у Бразилії – до 12 млн га, Індії – 6 млн га, Румунії – 3 млн га (Шевченко, 2018).

Кукурудза належить до високопродуктивних культур, потенціал урожайності якої значною мірою визначається рівнем агротехнологічного забезпечення, зокрема раціональним чергуванням культур у сівозміні та системою удобрення (Єрмакова і Крестьянінов, 2016; Асанішвілі та ін., 2020; Камінський і Асанішвілі, 2020; Шевченко та ін., 2020; Лень та ін., 2021; Гангур та ін., 2021).

Одним із ключових чинників формування та підвищення врожайності сільськогосподарських культур, зокрема кукурудзи в умовах Західного регіону України у зв'язку зі зміною клімату, є накопичення та раціональне використання вологи атмосферних опадів. Вона належить до важливих неконтрольованих абіотичних чинників, які обмежують продуктивність. Згідно із законом мінімуму, саме вміст доступної вологи

у ґрунті та її надходження з опадами протягом вегетаційного періоду визначають екологічний поріг і фактичний рівень урожайності за визначених ґрунтово-кліматичних умов (Барвінський, 2007; Борис і Красюк, 2020).

Кукурудза (*Zea mays* L.) порівняно з іншими зерновими культурами має підвищену потребу в елементах живлення, оскільки формує значну листостеблову масу. Для забезпечення високої врожайності необхідне внесення як мінеральних, так і органічних добрив, дози яких варіюють залежно від ґрунтово-кліматичних умов, біологічних особливостей культури та технології її вирощування (Шпаар, 2012; Волощук та ін., 2019; Тоцький і Лень, 2020; Лень та ін., 2021; Григорів і Турак, 2024).

Важливу роль також відіграє застосування мікродобрив у посівах сільськогосподарських культур, що сприяє регулюванню ростових процесів, підвищенню стійкості рослин до несприятливих гідротермічних умов, а також забезпечує зростання врожайності та поліпшення якості продукції (Молдован і Собчук, 2018; Chipman et al., 2001).

Багаторічні дослідження свідчать, що рівень мінерального живлення культур,

Таблиця 1

Схема досліду

Фактор А, гібриди	Фактор В, добрива	
	Доза, кг/га д. р.	Добриво
ДКС 3402	контроль (без добрив)	
ФАО 230	N ₅₀ P ₄₀ K ₄₀ – фон	
ДКС 3972	Ф + 150	Карбамід
ФАО 300	Ф + 150	КАС
ДКС 4897	Ф + 150	Карбамід + КАС
ФАО 380	Ф + 150	КАС

разом із попередниками, сортовими особливостями та кліматичними умовами, є ключовими чинниками, що регулюють формування врожаю з високими якісними показниками (Лихочвор, 2004; Созінов та ін., 2005; Камінський, 2013). Низка авторів відзначає високу ефективність органічних, мінеральних і альтернативних систем удобрення (Бердніков і Никитюк, 2004; Склянчук і Науменко, 2006). Досягнення запланованого рівня продуктивності кукурудзи доцільно здійснювати не шляхом унесення надмірних доз добрив, а через оптимізацію властивостей і життєвих процесів ґрунту, що сприятиме відновленню його родючості.

Кукурудза, окрім вагової частки у структурі зернових посівів регіону, є однією з основних кормових культур. Її широко використовують для заготівлі зеленого корму та силосу, що забезпечує тваринництво високоякісними концентрованими раціонами. У зв'язку із цим актуальності набувають наукові дослідження, які поряд з аналізом агротехнологічних чинників, що впливають на зернову продуктивність кукурудзи, зосереджуються також на вивченні особливостей технології її вирощування.

Мета нашого дослідження – установити вплив різних систем удобрення на продуктивність гібридів кукурудзи в умовах Західного регіону України з урахуванням агрокліматичних особливостей зони, з метою оптимізації елементів живлення для забезпечення високої врожайності.

Матеріал і методи

Оцінювали продуктивність різностиглих сортів кукурудзи та визначали оптимальні гібриди за різних систем удобрення в межах короткострокового виробничого досліду, проведеного протягом 2024 р. на базі фермерського господарства «Поточище», що розташоване в межах Коломийської ОТГ Івано-Франківської області.

Дослідження здійснювали на опідзоленому легкосуглинковому чорноземі, який мав такі агрохімічні характеристики: уміст гумусу становив 3,81%, кількість лужногідролізованого азоту – 104–119 мг/кг ґрунту, рухомого фосфору – 136–150 мг/кг, рухомого калію – 179–201 мг/кг, за показника кислотності ґрунтового розчину (рН сол.) – 6,5.

Варіанти досліду розміщували за принципом випадкової рендомізації із чотирикратним повторенням.

У межах дослідження було вивчено вплив двох факторів (табл. 1).

Вносили у фон нітроамофоску під культивування, Карбамід у посів, КАС у підживлення, а Карбамід + КАС вносили в посів, а потім проводили рядкове підживлення.

У процесі дослідження застосовували базові наукові методи: аналітичний, порівняльний, експериментальний і розрахунковий. Агротехніка вирощування була загальноприйнятою для зони вирощування за винятком факторів дослідження. Попередником слугувала соя.

Результати та обговорення

Добір гібридів кукурудзи, які найкраще адаптовані до умов окремого регіону, забезпечує повноцінну реалізацію їхнього біологічного потенціалу врожайності. На основі проведених наукових досліджень і фенологічних спостережень за ростом і розвитком рослин кукурудзи встановлено, що застосування азотних добрив позитивно впливає на тривалість міжфазних періодів і загальний вегетаційний період гібридів кукурудзи ДКС 3402 ФАО 230, ДКС 3972 ФАО 300 і ДКС 4897 ФАО 380.

Тривалість періоду «сівба – сходи» практично не залежала від застосованих елементів технології вирощування, що підтверджується даними таблиці 2 й узгоджується з науковими твердженнями про обмежений вплив агротехнічних заходів на цей етап. Основним чинником, який визначав тривалість періоду, залишалися погодні умови. Вплив мінерального удобрення, зокрема й основного й азотного, не зафіксовано, що зумовлено біологічними особливостями проростання, під час якого зернівка використовує переважно власні поживні речовини. У середньому тривалість фази «сівба – сходи» становила 6 діб.

Фенологічні спостереження впродовж періоду «сходи – цвітіння волоті» дали змогу визначити вплив систем удобрення та біологічних особливостей гібридів на його тривалість. Виявлено загальну тенденцію до подовження цього періоду під впливом

Таблиця 2

Тривалість міжфазних періодів рослин гібридів кукурудзи під впливом азотних добрив (середній показник за 2024 р.), діб

Варіант удобрення	Сівба – сходи	Сходи – цві- тіння волоті	Цвітіння волоті – молочна стиглість	Молочна – повна стиглість	Тривалість вегетаційного періоду
ДКС 3402 ФАО 230					
B1	6	43	15	32	96
B2	6	45	17	31	99
B3	6	48	18	32	104
B4	6	48	18	30	104
B5	6	51	19	33	109
ДКС 3972 ФАО 300					
B1	6	50	16	34	106
B2	6	52	18	36	112
B3	6	53	18	36	113
B4	6	52	20	36	114
B5	6	53	21	37	117
ДКС 4897 ФАО 380					
B1	6	52	17	34	109
B2	6	54	19	36	113
B3	6	55	19	36	114
B4	6	55	21	36	116
B5	6	57	22	37	122
НІР ₀₅		8,41	6,65	1,50	2,47
НІР ₀₅ за фактором А		3,75	2,95	0,66	1,09
НІР ₀₅ за фактором В		5,95	4,67	1,06	1,75

азотних добрив порівняно з контролем. Найдовшою фаза виявилась у гібрида ДКС 4897 ФАО 380 – 52–57 діб, тоді як у гібрида ДКС 3402 ФАО 230 – 43–51 доба.

Тривалість періоду варіювала залежно від типу азотних добрив. Подовження міжфазного періоду було зумовлено використанням добрива КАС-32 та сумісного застосування Карбамід + КАС. Інші види добрив (Карбамід) мали менш виражений вплив, водночас тривалість періоду становила для ДКС 4897 ФАО 380 48 діб, а для гібрида ДКС 3972 ФАО 300 – 53 доби, для ДКС 3402 ФАО 230 – 55 діб, що на 3 доби більше за контроль.

Період від сходів до цвітіння волоті є критичним для формування продуктивності кукурудзи, оскільки саме в цей час закладаються основи майбутньої врожайності та якості зерна. Наступний етап розвитку рослин – це період цвітіння до молочної стиглості зерна, під час якого продовжується вплив азотних добрив.

Тривалість вегетаційного періоду в гібридів кукурудзи варіює залежно від виду удобрення та гібрида. Для кожного гібрида спостерігається поступове збільшення три-

валості вегетації за підвищення доз унесення добрив (B1 – B5).

Найбільша тривалість вегетаційного періоду була зафіксована в гібридів ДКС 4897 ФАО 380 у разі використання сумісної дози добрив (B5) – 122 доби. Це підтверджує вплив добрив на подовження вегетаційного періоду, що може бути пов'язано з поліпшенням умов живлення рослин.

Вплив різних доз добрив на етапи розвитку рослин найбільш виражений на етапах «сходи – цвітіння волоті» та «цвітіння волоті – молочна стиглість», де збільшення дози добрив (B3, B4, B5) сприяло подовженню цих періодів.

Для гібрида ДКС 3402 ФАО 230 тривалість вегетаційного періоду зросла на 13 діб (від 96 до 109 діб) у результаті збільшення добрив із B1 до B5, що підтверджує важливість добрив для досягнення максимальної продуктивності.

Сумарний вплив унесення добрив на продуктивність і розвиток рослин проявляється через подовження фенофаз, що дозволяє досягти більшої біомаси та потенційної врожайності.

Отже, система удобрення, особливо з підвищенням доз добрив, має велике значення для подовження вегетаційного періоду та може позитивно впливати на формування продуктивності рослин кукурудзи.

Формування основних елементів структури врожаю кукурудзи зумовлюється комплексом чинників, серед яких провідну роль відіграють агротехнічні заходи вирощування, а також погодні умови та правильний добір гібридів.

Усвідомлення процесів формування елементів структури врожаю кукурудзи впродовж її вегетації та своєчасне впровадження заходів для їх оптимізації є ключовою умовою досягнення стабільно високих урожаїв. Значення цих показників визначається багатофакторністю, кожен чинник має специфічне місце в загальній структурі врожаю. Серед найважливіших – запаси продуктивної вологи у ґрунті, метеорологічні умови вегетаційного періоду, густота стояння рослин. Окрім того, істотний вплив мають добір гібридів і застосування відповідних агротехнологій (Каленська і Говенько, 2022).

З огляду на зазначені чинники, програмою наукових досліджень було передбачено

щорічне проведення структурного аналізу рослин кукурудзи. У результаті досліджень виявлено пряму залежність показників елементів структури врожаю від типу застосованих азотних добрив (табл. 3).

Застосування азотних добрив позитивно впливає на всі структурні елементи врожайності кукурудзи – кількість зерен у ряду, загальну кількість зерен у качані, масу зерна з качана, масу 1 000 зерен і загальну врожайність. Найвищі показники спостерігалися за використання найбільш насиченого варіанту удобрення (B5).

Зауважимо, що подібні результати отримані дослідниками Інституту сільського господарства Карпатського регіону НААН Н.М. Рудавською та Р.М. Гуком, які встановили, що за удобрення посівів кукурудзи повним мінеральним добривом у дозі $N_{90}P_{60}K_{60}$ спостерігали зростання маси 1 000 зерен на 105,0–113,3% (Рудавська і Гук, 2017).

Кількість зерен у качані збільшується завдяки наростанню зерен у ряду, тоді як кількість рядів залишалася стабільною (14 у всіх варіантах). Це свідчить про те, що азотне живлення переважно впливає на поперечний ріст зернівки.

Таблиця 3

Структурні компоненти врожайності гібридів кукурудзи залежно від типу азотних добрив, 2024 р.

Варіант удобрення	Кількість рядів, шт.	Кількість зерен у ряду, шт.	Кількість зерен у качані, шт.	Маса зерна з качана, г	Маса 1 000 зерен, г	Урожайність, т/га
ДКС 3402 ФАО 230						
B1	14	23	335	93,0	278	10,0
B2	14	27	390	110,6	280	10,9
B3	14	29	420	121,0	291	11,5
B4	14	31	446	125,6	293	11,7
B5	14	33	475	131,2	294	12,1
НІР ₀₅	–	3,12	69,01	22,98	10,58	1,22
ДКС 3972 ФАО 300						
B1	14	25	352	95,5	280	10,8
B2	14	27	415	112,2	282	11,5
B3	14	29	440	123,2	289	13,0
B4	14	31	440	123,4	291	13,2
B5	14	33	466	130,1	293	13,4
НІР ₀₅	–	6,24	87,53	24,76	11,51	1,38
ДКС 4897 ФАО 380						
B1	14	27	361	97,7	281	11,9
B2	14	29	421	116,5	288	13,3
B3	14	31	449	125,8	292	15,3
B4	14	33	451	126,0	293	15,3
B5	14	35	477	133,0	295	15,6
НІР ₀₅	–	5,15	78,21	42,36	11,61	1,41

Найвищу врожайність серед гібридів забезпечив ДКС 4897 (ФАО 380) у варіанті В5 – 15,6 т/га. Він також мав найвищі показники маси зерна з качана (133,0 г) та маси 1 000 зерен (295 г), що вказує на високу реалізацію потенціалу цього гібрида за оптимального азотного забезпечення.

Відмінності між варіантами удобрення були статистично достовірними, про що свідчать значення HP_{05} для кожного гібрида та показника. Це підтверджує істотний вплив типу азотного добрива на структурні елементи врожайності.

Гібриди різних груп стиглості по-різному реагували на тип азотного добрива: найвищу віддачу на удобрення продемонстрували гібриди середньо- та пізньостиглої групи (ДКС 3972 та ДКС 4897), що варто враховувати під час розроблення технологічних карт вирощування у відповідному регіоні.

Ці результати свідчать про необхідність диференційованого підходу до удобрення

залежно від біологічних особливостей гібридів кукурудзи.

Висновки

Добір гібридів, адаптованих до місцевих умов, забезпечує максимальну реалізацію потенціалу врожайності кукурудзи. Азотні добрива подовжують міжфазні періоди та вегетаційний період, особливо в гібридів середньо- і пізньостиглої групи (ДКС 3972, ДКС 4897).

Максимальна тривалість вегетації (122 доби) відмічена в гібрида ДКС 4897 за умов інтенсивного удобрення (В5). Подовження фаз розвитку під дією добрив сприяє формуванню більшої біомаси та врожайності.

Внесення азотних добрив позитивно впливає на структурні елементи врожаю – кількість зерен у качані, масу зерна та 1 000 зерен.

Гібрид ДКС 4897 показав найвищу врожайність (15,6 т/га) за варіанту В5, демонструючи кращу реакцію на азотне живлення.

Список використаної літератури

Асанішвілі Н.М., Буслаєва Н.Г., Шляхтурова С.П. Вплив агрохімічного навантаження на забезпеченість рослин елементами живлення та врожайність кукурудзи в Лісостепу. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2020. Вип. 32. С. 9–19.

Барвінський А.В. Фізичні властивості ґрунтів як важлива складова оцінки якості земель. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2007. Вип. 67. С. 35–42.

Бердніков О.М., Никитюк Ю.А. Роль сидерації в сучасному землеробстві. *Вісник аграрної науки*. 2004. № 3. С. 12–15.

Борис Н.Є., Красюк А.М. Поживний режим сірого лісового ґрунту залежно від систем основного обробітку і удобрення в короткоротаційній зерновій сівоzmіні. *Агробіологія*. 2020. Вип. 2. С. 16–26 [Електронний ресурс]. URL: https://agrobiologiya.btsau.edu.ua/sites/default/files/visnyku/agrobiologiya/boris_2_2020.pdf (дата звернення: 11.04.2025).

Волощук О.П., Волощук І.С., Глива В.В., Пащак М.О. Біологічні вимоги гібридів кукурудзи до умов вирощування в Західному Лісостепу. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*. 2019. Вип. 65. С. 22–36. <https://doi.org/10.32636/01308521.2019>.

Гангур В.В., Єремко А.С., Руденко В.В. Вплив елементів технології вирощування на продуктивності гібридів формування кукурудзи різних груп стиглості. *Таврійський науковий вісник*. 2021. № 117. С. 37–43. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.117.6>.

Григорів Я.Я., Турак Ю.О. Особливості вирощування кукурудзи в сучасних умовах (оглядова). *Таврійський науковий вісник*. 2024. Вип. 137. С. 70–76. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.137.9>.

Єрмакова А.М., Крестьянінов Є.В. Урожайність кукурудзи залежно від удобрення та гібриду на темно-сірих опідзолених ґрунтах. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2016. № 4. С. 63–65.

Каленська С.М., Говенько Р.В. Продуктивність кукурудзи залежно від забезпечення тепловими одиницями та живлення різними видами азотних добрив. *Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2022. Вип. 30. С. 112–121.

Камінський В.Ф. Науково-методичні основи досліджень з розроблення технологій вирощування сільськогосподарських культур. *Збірник наукових праць Національного наукового центру «Інститут землеробства Національної академії аграрних наук України»*. 2013. Вип. 1/2. С. 3–9.

Камінський В.Ф., Асанішвілі Н.М. Формування якості зерна кукурудзи різних напрямів використання залежно від технології вирощування в Лісостепу. *Корми і кормовиробництво*. 2020. Вип. 89. С. 74–84.

Лень О.І., Тоцький В.М., Гангур В.В., Єремко Л.С. Вплив системи удобрення та основного обробітку ґрунту на продуктивність гібридів кукурудзи. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2021. № 2-6. С. 52–58. <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.02.06>.

Лихочвор В.В. Рослинництво. Технології вирощування сільськогосподарських культур. Київ, 2004. 808 с.

Молдован Ж.А., Собчук С.І. Оцінка показників індивідуальної продуктивності рослин кукурудзи за допосівної обробки насіння та позакореневого підживлення. *Зернові культури*. 2018. Т. 2. № 1. С. 101–108. <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0014>.

Рудавська Н.М., Гук Р.М. Вплив удобрення на формування врожаю гібридів кукурудзи. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*. 2017. Вип. 61. С. 123–134

Скляничук В.М., Науменко М.Д. Вплив елементів біологізації землеробства на врожайність сільськогосподарських культур у Західному Поліссі. *Збірник наукових праць Національного наукового центру «Інститут землеробства Національної академії аграрних наук України»*. Київ : ЕКМО, 2006. С. 112–118.

Созінов О.О., Бурда Р.І., Тараріко Ю.О., Придатко В.І., Штепа Ю.М. Агросфера як провідний фактор сталого розвитку України. *Вісник аграрної науки*. 2005. № 10. С. 5–13.

Тоцький В.М., Лень О.І. Продуктивність гібридів кукурудзи залежно від системи удобрення та основного обробітку ґрунту. *Селекція і насінництво*. 2020. № 117. С. 199–205. <https://doi.org/10.30835/2413-7510.2020.207173>.

Шевченко Н.В. Тривалість міжфазних періодів рослин гібридів кукурудзи залежно від обробки та позакореневих підживлень. *Збалансоване природокористування*. 2018. Вип. 1. С. 73–76.

Шевченко М.С., Десятник А.М., Деревенець-Шевченко К.А., Швець Н.В. Сучасні системи землеробства і нове трактування сівозмінної цінності сільськогосподарських культур. *Зернові культури*. 2020. Т. 4. № 2. С. 319–329. <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0141>.

Шпаар Д. Кукурудза: вирощування, збір, зберігання і використання : монографія. Київ : Зерно, 2012. 464 с.

Chipman R.B., Raper C.D., Patterson R.P. Allocation of nitrogen and dry matter for two soybean genotypes in response to water stress during reproductive growth. *Journal of Plant Nutrition*. 2001. № 24. Р. 873–884.

References

Asanishvili, N.M., Buslaieva, N.H., & Shliakhturova, S.P. (2020). Vplyv aghrokhimichnoho navantazhennia na zabezpechenist roslin elementamy zhyvlennia ta vrozhajnist kukurudzy v Lisostepu [Effect of agrochemical load on nutrient supply and maize yield in the Forest-Steppe]. *Podilskyi visnyk: silske hospodarstvo, tekhnika, ekonomika* [Podillia Bulletin: Agriculture, Engineering, Economics], 32, 9–19 [in Ukrainian].

Barvynskyi, A.V. (2007). Fizychni vlastyvoli rruntyv yak vazhlyva skladova otsinky yakosti zemel [Physical properties of soils as an important component of land quality assessment]. *Ahrokhimiia i gruntoznavstvo* [Agrochemistry and Soil Science], 67, 35–42 [in Ukrainian].

Berdnikov, O.M., & Nykytiuk, Yu.A. (2004). Rol syderatsii v suchasnomu zemlerobstvi [Role of green manure in modern agriculture]. *Visnyk ahrarnoi nauky* [Bulletin of Agricultural Science], 3, 12–15 [in Ukrainian].

Borys, N.Ye., & Krasiuk, L.M. (2020). Pozhyvnyj rezhym siroho lisovoho rruntyv zalezhno vid system osnovnoho obrobittu i udobrennia v korotkorotatsiinii zernovii sivozmini [Nutrient regime of grey forest soil depending on tillage and fertilization systems in a short-rotation grain crop rotation]. *Ahrobiolohiia* [Agrobiology], 2, 16–26. [Electronic resource] URL: https://agrobiologiya.btsau.edu.ua/sites/default/files/visnyky/agrobiologiya/boris_2_2020.pdf (access date 11.04.2025) [in Ukrainian].

Voloshchuk, O.P., Voloshchuk, I.S., Hlyva, V.V., & Pashchak, M.O. (2019). Biolohichni vymohy hibridiv kukurudzy do umov vyroshchuvannia v Zakhidnomu Lisostepu [Biological requirements of maize hybrids for growing conditions in the Western Forest-Steppe]. *Peredhirne ta hirske zemlerobstvo i tvarynnystvo* [Foothill and Mountain Agriculture and Animal Husbandry], 65, 22–36. <https://doi.org/10.32636/01308521.2019> [in Ukrainian].

Hanhur, V.V., Yeremko, L.S., & Rudenko, V.V. (2021). Vplyv elementiv tekhnolohii vyroshchuvannia na produktyvnist hibridiv kukurudzy riznykh hrup styhlosti [Effect of growing technology elements on productivity of maize hybrids of different maturity groups]. *Tavriiskyi naukovi visnyk* [Tavriya Scientific Bulletin], 117, 37–43. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.117.6> [in Ukrainian].

- Hryhoriv, Ya.Ya., & Turak, Yu.O. (2024). Osoblyvosti vyroshchuvannya kukurudzy v suchasnykh umovakh (ohliadova) [Peculiarities of maize cultivation under modern conditions: a review]. *Tavriyskyi naukovyi visnyk [Tavriya Scientific Bulletin]*, 137, 70–76. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.137.9> [in Ukrainian].
- Kalenska, S.M., & Hovenko, R.V. (2022). Produktivnist kukurudzy zalezno vid zabezpechennia teplovymy odynytsiamy ta zhyvlennia riznymi vydamy azotnykh dobryv [Maize productivity depending on thermal unit supply and nutrition with different types of nitrogen fertilizers]. *Naukovi pratsi Instytutu bioenerhetychnykh kultur i tsukrovyykh buriakiv [Scientific Works of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beets]*, 30, 112–121 [in Ukrainian].
- Kaminskyi, V.F. (2013). Naukovometodychni osnovy doslidzhen z rozroblennia tekhnolohii vyroshchuvannya silskohospodarskykh kultur [Scientific and methodological basis of research on the development of crop cultivation technologies]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho naukovoho tsentru "Instytut zemlerobstva Natsionalnoi akademii ahrarykh nauk Ukrainy" [Collection of scientific works of the National Scientific Center "Institute of Agriculture of the National Academy of Agricultural Sciences of Ukraine"]*, 1/2, 3–9 [in Ukrainian].
- Kaminskyi, V.F., & Asanishvili, N.M. (2020). Formuvannya yakosti zerna kukurudzy riznykh napriamiv vykorystannia zalezno vid tekhnolohii vyroshchuvannya v Lisostepu [Formation of grain quality of maize hybrids for various uses depending on cultivation technology in the Forest-Steppe]. *Kormy i kormovyrobnytstvo [Feed and Feed Production]*, 89, 74–84 [in Ukrainian].
- Len, O.I., Totskyi, V.M., Hanhur, V.V., & Yeremko, L.S. (2021). Vplyv systemy udobrennia ta osnovnoho obrobittu rruntu na produktyvnist hibridiv kukurudzy [Effect of fertilization and tillage systems on maize hybrid productivity]. *Visnyk PDAA [Bulletin of Poltava State Agrarian Academy]*, 2-b, 52–58. <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.02.06> [in Ukrainian].
- Lykhochvor, V.V. (2004). Roslynnnytstvo. Tekhnolohii vyroshchuvannya silskohospodarskykh kultur [Crop production. Technologies for growing agricultural crops]. Kyiv: 808 p. [in Ukrainian].
- Moldovan, Zh.A., & Sobchuk, S.I. (2018). Otsinka pokaznykiv indyvidualnoi produktyvnosti roslyn kukurudzy za doposivnoi obrobky nasinnia ta pozakorennievoho pidzhyvlennia [Evaluation of individual maize plant productivity indicators under seed pre-treatment and foliar feeding]. *Zernovi kultury [Cereal Crops]*, 2(1), 101–108. <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0014> [in Ukrainian].
- Rudavska, N.M., & Huk, R.M. (2017). Vplyv udobrennia na formuvannya vrozhaui hibridiv kukurudzy [Effect of fertilization on the formation of maize hybrid yield]. *Peredhirne ta hirske zemlerobstvo i tvarynnnytstvo [Foothill and Mountain Agriculture and Animal Husbandry]*, 61, 123–134 [in Ukrainian].
- Shevchenko, M.S., Desiatnyk, L.M., Derevenets-Shevchenko, K.A., & Shvets, N.V. (2020). Suchasni systemy zemlerobstva i nove traktuvannya sivzminnoi tsinnosti silskohospodarskykh kultur [Modern farming systems and new interpretation of crop rotation value of agricultural crops]. *Zernovi kultury [Cereal Crops]*, 4(2), 319–329. <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0141> [in Ukrainian].
- Shevchenko, N.V. (2018). Tryvalist mizhfaznykh periodiv roslyn hibridiv kukurudzy zalezno vid obrobky ta pozakorenevykh pidzhyvlenn [Duration of interphase periods of maize hybrid plants depending on treatments and foliar feeding]. *Zbalansovane pryrodokorystuvannya [Balanced Nature Management]*, 1, 73–76 [in Ukrainian].
- Shpaar, D. (2012). Kukurudza: vyroshchuvannya, zbir, zberihannya i vykorystannia: monohrafiia [Maize: cultivation, harvesting, storage and use: monograph]. Kyiv: Zerno, 464 p. [in Ukrainian].
- Sklianchuk, V.M., & Naumenko, M.D. (2006). Vplyv elementiv biolohizatsii zemlerobstva na vrozhaunist silskohospodarskykh kultur u Zakhidnomu Polissi [Effect of biologization elements in farming on crop yields in Western Polissia]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho naukovoho tsentru "Instytut zemlerobstva Natsionalnoi akademii ahrarykh nauk Ukrainy" [Collection of scientific works of the National Scientific Center "Institute of Agriculture of the National Academy of Agricultural Sciences of Ukraine"]*, Kyiv: EKMO, pp. 112–118 [in Ukrainian].
- Sozinov, O.O., Burda, R.I., Tarariko, Yu.O., Prydatko, V.I., & Shtepa, Yu.M. (2005). Aghrosfera yak providnyy faktor stalogo rozvytku Ukrainy [Agrosphere as a leading factor of sustainable development in Ukraine]. *Visnyk ahrarykh nauk [Bulletin of Agricultural Science]*, 10, 5–13 [in Ukrainian].
- Totskyi, V.M., & Len, O.I. (2020). Produktivnist hibridiv kukurudzy zalezno vid systemy udobrennia ta osnovnoho obrobittu gruntu [Productivity of maize hybrids depending on fertilization and basic tillage systems]. *Selektsiia i nasinnnytstvo [Breeding and Seed Production]*, 117, 199–205. <https://doi.org/10.30835/2413-7510.2020.207173> [in Ukrainian].

Yermakova, L.M., & Krestianinov, Ye.V. (2016). Vrozhajnist kukurudzy zalezno vid udobrennia ta hybrida na temno-siryh opidzolenyh gruntakh [Maize yield depending on fertilization and hybrid on dark grey podzolized soils]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii [Bulletin of Poltava State Agrarian Academy]*, 4, 63–65. [Electronic resource] URL: <https://www.pdau.edu.ua/sites/default/files/visnyk/2016/04/14.pdf> (access date 15.04.2025) [in Ukrainian].

Chipman, R.B., Raper, C.D., & Patterson, R.P. (2001). Allocation of nitrogen and dry matter for two soybean genotypes in response to water stress during reproductive growth. *Journal of Plant Nutrition*, 24, 873–884 [in English].

Отримано: 24.04.2025

Прийнято: 15.05.2025



УДК 635.15:631.5

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.26>

ЕФЕКТИВНІСТЬ КОМПЛЕКСНОГО ЗАСТОСУВАННЯ СИДЕРАТИВ ІЗ БІОДОБРИВАМИ ЗА ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ НА ЗЕРНО

Я. Г. Цицюра¹

Визначено для України, що з позиції формування оптимізованих систем удобрення актуальним завданням є адаптація сидеральних систем удобрення завдяки використанню хрестоцвітних видів рослин-сидератів – редьки олійної та гірчиці білої, які адаптовані до ґрунтово-кліматичних умов Лісостепової зони. Саме даний спосіб удобрення, у поєднанні з мінеральним фоновим живленням, забезпечує реалізацію принципів екологізації та біологізації, сприяє поверненню до адаптивних технологій ґрунтозбереження та ґрунтореабілітації.

За багаторічний період досліджень (2022–2024 роки) визначено ефективність застосування сидеральної системи із включенням редьки олійної та гірчиці білої на фоні застосування біодобрива Органік баланс у системі удобрення кукурудзи на зерно на сірих лісових ґрунтах, типових для ґрунтового покриву зони Лісостепу Правобережного.

За результатами досліджень визнано доцільним за вирощування кукурудзи на зерно варіант сидерації, який передбачає застосування біодобрива Органік баланс у нормі 2 л/га у поєднанні із загортанням, шляхом оранки, подрібненої маси редьки олійної та гірчиці білої загальною масою 18 т/га на фоні удобрення в нормі $N_{60}P_{60}K_{60}$. Застосування такого технологічного варіанту дозволило скоротити загальний рівень забур'яненості кукурудзи на 49,4% (сиря маса бур'янів) та на 55,0% (суха маса бур'янів) та забезпечило досягнення врожайності на рівні 8,18 т/га із приростом до контролю без сидерації та застосування біодобрива 21,2%.

Ключові слова: сидерація, редька олійна, гірчиця біла, біоорганічні добрива, забур'яненість, урожайність.

EFFICIENCY OF COMPLEX APPLICATION OF GREEN MANURE WITH BIOFERTILIZERS FOR GROWING MAIZE FOR GRAIN

Y. G. Tsytsiura

It has been determined for Ukraine that from the point of view of the formation of optimized fertilization systems, the adaptation of green manure systems through the use of cruciferous green manure plant species – oil radish and white mustard, which are adapted to the soil and climatic conditions of the Forest-Steppe zone – is an urgent task. This method of fertilization, combined with mineral

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

background nutrition, ensures the implementation of the principles of ecologization and biologization and promotes the return to adaptive soil conservation and soil rehabilitation technologies.

Over a multi-year research period (2022–2024), the effectiveness of the green manure system with the inclusion of oil radish and white mustard against the background of the use of Organic Balance biofertilizer in the corn fertilization system on gray forest soils typical of the soil cover of the Right-Bank Forest-Steppe zone was determined.

According to the results of the research, it was found expedient to use a green manure option for growing corn for grain, which involves the use of Organic Balance biofertilizer at a rate of 2 l/ha in combination with the incorporation, by plowing, of a crushed mass of oil radish and white mustard with a total weight of 18 t/ha against the background of fertilizer at a rate of $N_{60}P_{60}K_{60}$. The use of this technological variant allowed to reduce the overall level of weed infestation of corn by 49,4% (wet weight of weeds) and 55,0% (dry weight of weeds) and ensured the achievement of a yield of 8,18 t/ha with an increase to the control without green manure and the use of biofertilizer of 21,2%.

Key words: green manure, oil radish, white mustard, bioorganic fertilizers, weediness, yield.

Вступ

За останній період у системах агротехнологій вирощування основних сільськогосподарських культур відбуваються істотні зміни. Ці зміни стосуються підходів до варіантів удобрення у зв'язку з дефіцитом класичних органічних добрив. Світова практика удобрення базується здебільшого на органо-мінеральній стратегії удобрення, формуючи відповідний рівень її біологізації, тобто співвідношення між унесеною нормою діючої речовини мінеральних добрив на 1 т застосованих органічних. Оптимум цього показника передбачає наявність до 15 кг діючої речовини мінерального живлення на 1 т органічного (Berezyuk et al., 2021; Drescher et al., 2021).

Проте перехід утримання сільськогосподарських тварин на біорециклінгові варіанти, де фізіологічні відходи, які потенційно трансформуються у гноєві маси, стають об'єктом біоенергетичного виробництва з переробкою на біогаз, отримання похідного продукту такого виробництва – дигестату (Honcharuk & Tokarchuk, 2024; Tokarchuk et al., 2024). У результаті ланка нагромадження органічних добрив суттєво зменшується (Lei et al., 2022).

Також намітилась тенденція до інтенсивного та сталого й динамічного зниження чисельності поголів'я тварин усіх видів груп. Це негативно відобразилось на загальній динаміці накопичення органіки, яку потенційно можна було б використати в системах удобрення (Naher et al., 2021; Li et al., 2024).

Водночас наголошується (Wang et al., 2020; Olf et al., 2021), що найбільш раціональні моделі удобрення є органо-мінеральні. Такі варіанти найбільш відповідають завданням збереження ґрунтової родючості, зниження темпів агрохімічної

деградації, забезпечення умов ґрунтореабілітації, особливо на ґрунтах низького та середнього потенціалу. Такі системи, окрім того, найбільш відповідають природним процесам колообігу органіки й поживних речовин, сприяють стабілізаційним процесам ґрунтового живлення та позитивного балансу макро- і мікроелементів у ґрунтовому профілі (dos Santos Nascimento et al., 2021; Deus et al., 2022; Bublit et al., 2022).

Сучасні варіанти удобрення кукурудзи також здебільшого представлено рекомендаціями з максимально доцільного застосування органічних і біоорганічних компонентів у поєднанні з фоновим мінеральним удобренням та застосуванні комплексу позакоренових підживлень (Fan et al., 2020; Wei et al., 2020; Hlushchenko et al., 2024; Kucerik et al., 2024). Рекомендована частка біоорганічних компонентів визначається потенціалом родючості ґрунтів, насиченістю сівозмін кукурудзою та іншими просапними культурами, особливостями ресурсної ємності конкретного генотипу кукурудзи, характером загальної орієнтованості виробництва (органічне чи класичне) (Qi et al., 2024).

Зазначається також (Wei et al., 2020; Pimentel et al., 2023; Pál et al., 2024), що доцільність застосування органічних компонентів удобрення узгоджується з показниками гідротермічних умов періоду вегетації, рівномірністю розподілу опадів, строками сівби самої культури.

Незважаючи на відпрацьовані моделі систем удобрення кукурудзи, які передбачають частку органічного компоненту живлення від 10 до 50–60%, багато питань ефективності залишаються невирішеними (Wei et al., 2020). Насамперед це стосується питань форм органічних добрив із позиції складу, походження, а також характеру їх розподілу з огляду на строки внесення та

поєднання із класичними мінеральними добривами (Saleem et al., 2020; Hudek et al., 2022; Gao et al., 2024).

Окремим проблемним аспектом залишаються питання застосування сидераційних варіантів удобрення кукурудзи, зокрема питання видової ефективності окремих сидератів і спряжених ефектів їхньої дії як безпосередньо на підвищення продуктивності (урожайність і якість урожаю), так і на властивості ґрунту, стабілізації його агрохімічного потенціалу тощо (Hudek et al., 2022; Gentsch et al., 2024; Kemper, 2024).

Отже, рекомендації щодо використання сидератів у вирощуванні кукурудзи мають різномірний характер із різних агротехнологічних позицій – вид сидерату, спосіб сидерації, строки сидерації, норми сидерального компоненту. Це створює деякі труднощі в детермінації оптимальних моделей застосування цих технологій у вирощуванні не тільки кукурудзи на зерно, але й інших культур просапної технологічної групи (Duff et al., 2020; Wang et al., 2020).

За результатами оцінювання (Tsytisiura, 2024a; Tsytisiura, 2024b), редька олійна як вид (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) характеризується високим адаптивним потенціалом, має досяжний рівень біопродуктивності надземної маси – до 30 т/га, а кореневої маси до 11–13 т/га. Культура також підтвердила невибагливість до термінів сівби та наявність алелопатичного високого потенціалу з позиції конкурентоспроможності щодо основних бур'янів. Відомо також її ефективне застосування в технологіях біофумігації та фіторемедіа-

ції. Комплексом цінних властивостей володіє гірчиця біла як відомий і давно застосовуваний сидеральний компонент для зони Лісостепу.

Зважаючи на зроблені вище висновки, важливим було дослідження ефективності застосування варіанту проміжної сидерації із застосуванням обох згадуваних хрестоцвітних культур за поєднання застосування біодобрива (для прискорення і оптимізації процесу іммобілізації сидеральної маси) для вирощування кукурудзи на зерно на сірих лісових ґрунтах.

Матеріал і методи

Дослідження проводились упродовж 2022–2024 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 середньозважені показники: уміст 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_{сол.} – 5,8.

Для досягнення поставленої мети досліджень було сформовано схему досліду, візуалізація якої наведена в таблиці 1.

Попередником у всіх варіантах досліду була озима пшениця. У досліді була застосована зональна агротехніка вирощування кукурудзи на зерно. Статистично система варіантів була сформована у чотирикратній повторності методом двоярусної повної рендомізації в межах кожного повторення за розмірів облікової площі ділянки 50 м². Передпосівний обробіток під посів сидерального агрофітоценозу як редьки олійної, так

Таблиця 1

Схема досліду з вивчення варіантів проміжної сидерації за вирощування кукурудзи на зерно, 2022–2024 рр.

Застосування додаткового ком- поненту біодобрива (чинник А)		Варіант сидерації (чинник В)	
контроль (без сидерації та застосування біодобрива на фоні N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀)			
Без використання біодобрива	А1	сидеральна маса гірчиці білої (18 т/га*)	В1
		сидеральна маса редьки олійної (18 т/га)	В2
		комбіноване застосування сидеральної маси гірчиці білої та редьки олійної (18 т/га)	В3
Сумісне застосування Органік Баланс (2 л/га)	А2	сидеральна маса гірчиці білої (18 т/га*)	В1
		сидеральна маса редьки олійної (18 т/га)	В2
		комбіноване застосування сидеральної маси гірчиці білої та редьки олійної (18 т/га)	В3

Примітка. * – біопродуктивність визначена на підставі середньобагаторічного досяжного показника для зони досліджень на сірих лісових ґрунтах для обох сидератів.

і гірчиці білої проводився із застосуванням дискування у два сліди на глибину 6–8 см після збору попередника та наступного комбінованого обробітку на глибину 12–14 см.

Фонове мінеральне удобрення згідно зі схемою досліду було розподілено таким чином: фосфорні та калійні добрива (повною нормою) було внесено під дискування, азотні добрива – під передпосівний обробіток під кукурудзу.

Сидеральна маса загорталась у ґрунт під час оранки на глибину 25–27 см з обов'язковим її скошуванням і подрібненням за досягнення обома культурами фенологічної фази початку цвітіння. Для варіанту із застосуванням біодобрива скошену та подрібнену масу сидерату перед загортанням у ґрунт обробляли біодобривом Органік баланс у нормі 2 л/га за витрати робочого розчину до 300 л/га.

Висівався гібрид кукурудзи ДКС 3609, агроценоз якого формувався за густоти стояння 75 тис. рослин/га за сівби у третій декаді квітня.

Застосоване біодобриво Органік баланс належить до біологічних препаратів з активністю біофіксації азоту та стабілізації сполук фосфору з наявним ефектом деструктора рослинних решток. Його застосування сприяє оптимізації процесу розкладання сидеральної маси з позитивними темпами мінералізації, що сприяє поліпшенню впливу процесу сидерації на комплекс властивостей ґрунту та гармонізації процесів вивільнення мінеральних сполук із рослинної маси у процесі гниття, гарантує підтримання ефекту стабілізації накопичення органічного вуглецю у ґрунтовому профілі. До складу біодобрива входять такі мікроорганізми та штами бактерій: *Bacillus subtilis*, *Azotobacter chr.*, *Paenibacillus polymyxa* (за титру 1×10^8 – 1×10^9 КУО/см³). Також у складі добрива присутні фітогормони, біоферментні та вітамінні комплекси, що створює оптимальні умови для активізації позитивних процесів мікробіологічного розкладу рослинної маси сидерату.

ДКС 3609 (ФАО 260) характеризується як середньостиглий генотип із високим рівнем урожайності та комплексом адаптивних властивостей. Добре реагує на оптимізацію фону мінерального й органічного живлення, має високий коефіцієнт окупності удобрення приростами врожаю.

Середні показники стійкості до хвороб і шкідників оцінено у 8,7 бала. Посухостійкий із широкими адаптивним

механізмом до строків сівби. За результатами екологічного зонального сортовипробування мав такі морфометричні характеристики: висоту стебла до 2,4 м, загальну довжину качана на рівні 12–15 см, діаметр качана в інтервалі 4,8–5,2 см за кількості рядів зерен 14–15 шт. і маси 1 000 зерен в інтервалі 303–324 г. Рівень зернової продуктивності оцінено в 10–12 т/га. Рекомендована оптимальна густота стояння в інтервалі 70–75 тис. рослин на га.

Оцінювання зернової продуктивності кукурудзи в усіх варіантах досліду, а також подальшу поділянкову та загальну калькуляцію врожайності зерна проводили відповідно до рекомендованої методики оцінювання рівня продуктивності кукурудзи в переведення на стандартний рівень вологості зерна (14%) (європейський підхід відповідно до (Badu-Apraku et al., 2012)).

Статистичну обробку отриманих експериментальних даних проведено відповідно до стандартних методів (Wong, 2018) із застосуванням програмних пакетів “Exel” та “Statistica 10”.

Результати

Погодні умови в роки проведення досліджень зафіксовано і деякими відхиленнями від середньобогаторічного рівня, особливо для показника суми опадів (табл. 2, рис. 1). У підсумку це сформувало передумови для зростання загальної варіативності показника індексу зволоження до рівня 27,9%.

Відмічено істотність варіювання показника кількості опадів за загальний період від сходів до приорювання сидератів. Погодні умови у 2022 та 2023 рр. характеризувались як відносно сприятливі для реалізації продуктивності гібридів кукурудзи в регіоні досліджень. Для умов 2024 р. відмічено аномально високі температури в період другої декади липня – першої декади серпня, що сформувало передумови для зниження зернової продуктивності в середньому на 18–22% на фоні зменшення тривалості вегетаційного періоду культури в середньому на 8,5 доби (див. рис. 1).

На основі обліку рівня забур'яненості агроценозів кукурудзи, за використання різних варіантів сидерації, доведено протибур'янову ефективність хрестоцвітих сидератів (табл. 3). Це підтверджено зіставленням показників загальної забур'яненості посівів кукурудзи контрольного варіанту та варіантів сидерації. Застосування редьки олійної як сидерату було більш ефективним,

Таблиця 2

Основні складники гідротермічного режиму періоду вегетації рослин-сидератів, 2022–2024 рр.

Роки та періоди оцінювання VII–XII/I–IV	За період				
	Показник середньодобової температури повітря за період, °C	Загальна сума активних температур, °C	Сума опадів, мм	Відносна вологість повітря, %	Загальний індекс зволоження, мм/°C
2021/2022 рр.	7,66	2329,3	481,2	78,5	0,207
2022/2023 рр.	8,41	2546,8	855,5	78,1	0,336
2023/2024 рр.	10,05	3056,5	747,9	76,8	0,245

з огляду на зниження показника загальної кількості бур'янів на 21,9% порівняно з контролем. Для варіанту використання гірчиці білої аналогічний показник був на рівні 14,4%.

Комбіноване застосування обох видів рослин сидератів посилювало ефект редукції кількості бур'янів, підвищувало цей показник на 6,5% у зіставленні з однокомпонентним застосуванням редьки олійної. Подібна тенденція у значенні 22,84% відмічена і для досліджуваного показника сформованої сухої маси бур'янів.

Доведено позитивну посилювальну роль протибур'янового ефекту за використання додаткового чинника оптимізації розкладення сидеральної маси у ґрунті – використання біодобрива Органік баланс. Так, у варіантах однокомпонентного використання редьки олійної додавання до маси перед сидерацією даного біодобрива підвищувало загальний ефект зниження кількості бур'янів до 23,50%, для аналогічного варіанту з гірчицею білою – до 18,06%. Загальний коефіцієнт зростання редукції кількості бур'янів за зіставлення комбіновано видових варіантів сидерації становив 1,42 на користь варіанту з додатковим застосуванням біодобрива Органік баланс.

У підсумку мінімальний показник рівня забур'яненості було відмічено саме у варіанті максимального поєднання факторів сидерації з рівнем забур'яненості 162,3 шт./м² (8,58 г/м² у сухій речовині). Тобто загальний показник зниження вказаних показників до контрольного варіанту в досліді становив 49,4 та 55,0% відповідно.

На підставі отриманих даних можна стверджувати, що застосування проміжної сидерації у вирощуванні кукурудзи на зерно відіграє роль біологічного регулятора рясності сегетальної рослинності з вираженим редуруючим ефектом, який не несе

додаткового навантаження на екологічну рівновагу агроценозу поля, але бере на себе частково функції ґрунтових гербіцидів, які широко застосовуються в сучасних технологіях вирощування кукурудзи на зерно. Такий ефект є також позитивним із позиції зниження загальної собівартості виробництва зерна кукурудзи завдяки прогнозованому зниженню витрат на пестицидну групу агрохімікатів.

Підтверджено позитивний сталий вплив застосування варіантів сидерації за вирощування кукурудзи на структуру індивідуальної зернової продуктивності (табл. 4).

Зазначено загальний позитивний вплив досліджуваних варіантів сидерації на формування вагових і структурних елементів індивідуальної продуктивності як рослини загалом, так і качана зокрема. Установлено специфіку формування показників у розрізі окремих варіантів дослідів. Так, варіант з однокомпонентною сидерацією гірчицею білою забезпечив усереднені прирости загальної маси рослин на рівні 7,54%, кількості качанів у розрахунку на 100 рослин на 2,85%, загальної довжини качана на 2,35%, а виходу зерна з качана на 7,53% відповідно. Однокомпонентна сидерація редькою олійною за збереження тієї ж тенденції росту показників мала вищі рівні їх значення із середнім за показниками індексом зростання на рівні 2,37%.

Максимальні значення приростів було визначено у варіанті комбінованого поєднання сидеральної маси редьки олійної та гірчиці білої, де показники приростів до контролю становили 11,74, 5,14, 5,67 та 10,92% відповідно. Додаткове використання біодобрива Органік баланс сприяло зростанню ефекту приросту з усередненим коефіцієнтом по комплексу відмічених морфоознак на рівні 1,056 (5,62%).

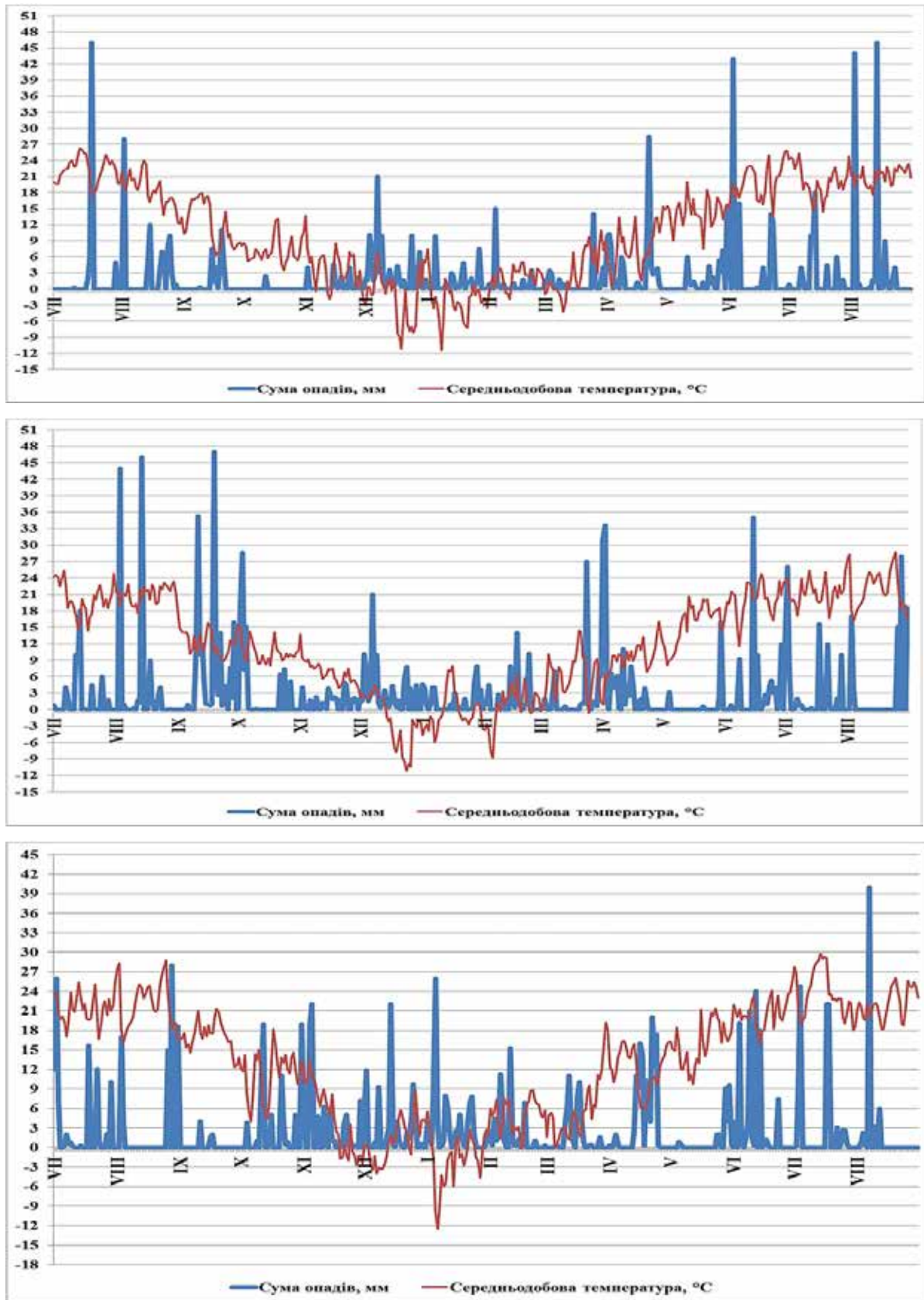


Рис. 1. Гідротермічний режим у роки проведення досліджень (річний цикл), 2021–2024 рр. (послідовно згори – до низу: 2021/2022; 2022/2023; 2023/2024 річні періоди)

Таблиця 3

Рівень присутності сегетальної рослинності в посівах кукурудзи гібрида ДКС 3609 за різних варіантів проміжної сидерації (у середньому за 2022–2024 рр.), шт./м²

Варіант сидерації	Облікова чисельність бур'янів у фазі повних сходів			
	шт./м ²	± до контроль-ного варіанту	у сухій масі, г/м ²	± у зіставленні з контролем
1	320,5	–	41,13	–
2	274,2	–46,3	36,09	–5,04
3	250,3	–70,2	32,25	–8,88
4	229,4	–91,1	31,74	–9,39
5	224,7	–95,8	29,44	–11,69
6	191,7	–128,8	24,42	–16,71
7	162,3	–158,2	18,58	–22,55
НІР ₀₅	4,108	–	2,273	–

Примітка: 1 – контрольний (без сидерації на фоні внесення N₆₀P₆₀K₆₀); 2 – сидерація гірчицею білою (18 т/га); 3 – сидерація редькою олійною (18 т/га); 4 – комбінований варіант за сумісної сидерації гірчицею білою та редькою олійною (18 т/га); 5 – Органік баланс (2 л/га) + сидерація гірчицею білою (18 т/га); 6 – Органік баланс (2 л/га) + сидерація редькою олійною (18 т/га); 7 – Органік баланс (2 л/га) + сумісна сидерація гірчицею білою та редькою олійною (18 т/га).

Таблиця 4

Вплив варіантів проміжної сидерації на формування показників структури індивідуальної зернової продуктивності кукурудзи гібрида ДКС 3609 (середнє за період 2022–2024 рр.)

Варіант сидерації	Загальна маса однієї рослини, г	Число качанів на 100 облікових рослин, шт.	Середня довжина качана, см	Вихід зерна з качана, г	Показник маси 1 000 зерен, г
1	240,65	94,82	21,62	98,05	280,72
2	258,79	97,55	22,15	105,62	287,35
3	266,92	98,24	22,44	107,08	294,54
4	268,87	99,67	22,82	108,72	297,73
5	269,75	98,15	22,35	107,55	300,86
6	272,44	99,53	22,92	110,93	302,95
7	283,32	100,42	23,75	113,25	305,85
НІР ₀₅	1,117	0,124	0,753	0,814	8,94

Примітка: 1 – контрольний (без сидерації на фоні внесення N₆₀P₆₀K₆₀); 2 – сидерація гірчицею білою (18 т/га); 3 – сидерація редькою олійною (18 т/га); 4 – комбінований варіант за сумісної сидерації гірчицею білою та редькою олійною (18 т/га); 5 – Органік баланс (2 л/га) + сидерація гірчицею білою (18 т/га); 6 – Органік баланс (2 л/га) + сидерація редькою олійною (18 т/га); 7 – Органік баланс (2 л/га) + сумісна сидерація гірчицею білою та редькою олійною (18 т/га).

Потенціал зернової продуктивності досліджуваного генотипу кукурудзи з огляду на його ідіотипічну характеристику було досягнуто у варіанті поєднання біодобрива із сумісним застосуванням сидеральної маси гірчиці білої та редьки олійної, що ґрунту-

ється на результатах зіставлення даного варіанту досліді з контрольним з абсолютним приростом за показником ваги рослин на рівні 17,73%, кількістю качанів у розрахунку на 100 рослин на рівні 5,94%, за довжиною качана на рівні 9,75%, за виходом

зерна з качана на рівні 15,57%. Позитивний вплив встановлено і для показника маси 1 000 зерен, незважаючи на високу генотипову його детермінацію в кукурудзи. Водночас зберігалась та ж тенденція до формування максимального значення даного показника у варіантах поєднання біодобрива Органік баланс і двокомпонентної сидерації на рівні 305,85 г із приростом до контролю 25,13 г (8,95%).

Закономірно, що визначена динаміка формування показників морфометрії та вагової продуктивності мала ту ж динаміку формування за показником урожайності (табл. 5).

У підсумку визначено загальний позитивний вплив усіх варіантів сидерації на формування врожайності кукурудзи в усі роки обліків із приростами в інтервалі від 12,53 до 55,47% до контрольного варіанту. Максимальну врожайність у середньому за період оцінювання – 8,18 т/га (із приростом до контролю – 1,44 т/га) було обліковано на варіанті максимальної комбінаторики варіантів досліду за бінарновидової сидерації на фоні власне передсидераційного застосування біодобрива Органік баланс.

Обговорення

Доведено позитивний вплив сидерації, зокрема з використанням саме редьки олійної, на зниження рівнів забур'янення наступних культур у сівозміні після власне сидерального використання. Це стосувалось як рівнів загальної, так і рівнів потенційної забур'яненості. Це досягалось як за

результатами безпосереднього домінування в сидеральному агроценозі, так і завдяки біофумігаційному, фітореMediaційному та алелопатичному ефектам, властивим у технологіях сидерації саме хрестоцвітним видам рослин (Tsytisiura, 2024a).

Зазначено, що ефект гербоконкуренції сидератів має виражений видовий характер і залежить також від строку та термінів сидерації, продуктивності сформованої надземної та кореневої біомаси, фенологічних аспектів сидераційного використання рослин, типу та рівня забур'яненості поля до сидерації (Lei et al., 2022). Відмічена й різна специфічність впливу різних видів рослин сидератів на різні види та біологічні групи бур'янів. Зокрема, для редьки олійної та гірчиці білої найефективнішим був вплив на бур'яни озимої, зимуючої та ярої ранньої груп (Kemper, 2024).

Головними перевагами рослин сидератів є висока інтенсивність і динамізм накопичення надземної маси, що створює передумови для панівного пригнічення інших видів рослин на ранніх етапах їхнього росту й розвитку, імітуючи гербостатичний ефект у ценозі. Сидерація також сприяє ефективному зниженню рівня забур'яненості, в основному завдяки сумісному загортанню рослин бур'янів разом зі сформованою сидеральною масою, що імітує процес зниження рівня сегетальної поширеності видів саме завдяки застосуванню обробітку ґрунту у класичних землеробських системах (Duff et al., 2022).

Таблиця 5

Підсумкові показники рівня врожайності кукурудзи гібрида ДКС 3609 за різних варіантів сидерації, 2022–2024 рр. (т/га)

Варіант сидерації	Рік обліку			Середня за період	± до контрольного варіанту	
	2022 р.	2023 р.	2024 р.		т/га	%
1	7,15	8,15	5,35	6,75	–	–
2	7,90	8,92	6,08	7,50	0,77	11,12
3	8,05	9,09	6,21	7,65	0,91	13,35
4	8,35	9,39	6,51	7,95	1,22	17,84
5	8,02	9,24	6,00	7,62	0,88	12,92
6	8,27	9,45	6,29	7,87	1,14	16,64
7	8,58	9,59	6,77	8,18	1,44	21,25
НІР ₀₅ , т/га	0,28	0,26	0,34	0,31	–	–

Примітка: 1 – контрольний (без сидерації на фоні внесення $N_{60}P_{60}K_{60}$); 2 – сидерація гірчицею білою (18 т/га); 3 – сидерація редькою олійною (18 т/га); 4 – комбінований варіант за сумісної сидерації гірчицею білою та редькою олійною (18 т/га); 5 – Органік баланс (2 л/га) + сидерація гірчицею білою (18 т/га); 6 – Органік баланс (2 л/га) + сидерація редькою олійною (18 т/га); 7 – Органік баланс (2 л/га) + сумісна сидерація гірчицею білою та редькою олійною (18 т/га).

Додатковим чинником протисегетальної спрямованості сидератів хрестоцвітої групи є швидкі темпи початкових ростових процесів з інтенсивним покриттям поверхні поля, подальшого інтенсивного затінення та формування несприятливих умов для фотосинтетичної діяльності власне бур'янів у відповідному ярусі сидерального посіву – переважно в нижньому, на висоті до 50 см, що є недостатнім для успішної конкуренції з рослинами-сидератами, які, як-от хрестоцвіті види, охоплюють ярус висотою до 80 см (dos Santos Nascimento et al., 2021; Tsytisura, 2024a). Із цієї позиції ефективним буде використання сидерації, особливо за використання досліджуваних хрестоцвітих видів, у вирощуванні інтенсивних просапних культур, як-от кукурудза, соняшник, що гарантуватиме зниження пестицидного навантаження і органічність вирощеної продукції (Kemper, 2024).

Ці узагальнення підтверджено в результаті вивчення таких сидератів, як гірчиця біла, редька олійна, суріпиця, ріпак ярий. Саме для даних видів було підтверджено високий рівень протибур'янової ефективності у варіантах проміжної (післяжнісної та післяжнивної) сидерації (Gao et al., 2019; Pál et al., 2024). У підсумку, представлені нами результати досліджень позитивно корелюють із висновками таких учених, як (Ugrenović et al., 2019; Duff et al., 2022), підтверджують високі рівні сидераційного потенціалу за використання редьки олійної та гірчиці білої, особливо в застосованих варіантах їх поєднання.

Реалізація показників індивідуальної зернової продуктивності рослин кукурудзи визначається значною мірою показниками загального балансу споживання макро- та мікроелементів, а також рівня вмісту органічного вуглецю в орному горизонті та доступності рухомих форм базових елементів живлення (Drescher et al., 2021; Hlushchenko et al., 2024). Зазначені показники визначаються деяким впливом на процес формування таких додаткових чинників, як норми удобрення, строки сівби, густота стояння система захисту посіву тощо (Qi et al., 2024).

Отримані позитивні (за приростом) результати впливу варіантів сидерації на формування показників індивідуальної зернової продуктивності узгоджуються із процесами іммобілізації додаткових рухомих форм елементів живлення, зростання мікробіологічної активності ґрунтів, що

в підсумку загалом оптимізує процес агрохімічного забезпечення ростових і фізіологічних процесів, забезпечує підвищення рівня реалізації генотипового продуктивного потенціалу кукурудзи в агроценозі після сидерального використання. Це додатково стимулює всі ростові та фізіологічні обмінні процеси в рослині вже на ранніх стадіях її фенологічного розвитку (Hlushchenko et al., 2024; Pál et al., 2024).

Додатково пояснити позитивно формувальний вплив сидерації на підвищення продуктивності рослин кукурудзи можна і зміною структури живлення із суто мінерального на орґано-мінеральне. Така зміна має позитивні відклики на оптимізацію базових режимів і властивостей ґрунтів, що в підсумку оптимізує всі темпи та продуктивність ростових процесів рослин кукурудзи. У разі сидерації хрестоцвітими видами рослин така оптимізація здебільшого стосувалась оптимізації загальної пористості ґрунту, щільності, об'ємної ваги тощо (Saleem et al., 2020; Wei et al., 2020; Wang et al., 2020; Pimentel et al., 2023).

Зазначені висновки позитивно узгоджуються з результатами усередненого приросту показників структури індивідуальної зернової продуктивності в 10,7% у варіанті комбінованого застосування суміші хрестоцвітих сидератів і органічного біодобрива Органік баланс.

Звичайно, основним критерієм ефективності застосованих варіантів сидерації є кінцевий рівень урожайності кукурудзи (Badu-Apraku et al., 2012). Раніше наголошувалось, що кукурудза володіє високим потенціалом урожайності, сидерація має на меті сприяти його реалізації додатково до фонового мінерального живлення (Hlushchenko et al., 2024). Встановлено, що завдяки сидерації приріст даного показника коливається в широких межах, від 5,5 до 30,7% (Wang et al., 2020). Отриманий приріст у наших дослідженнях завдяки поєднанню двох видів сидератів і біодобрива Органік баланс становив 21,2%, що з посиланням на висновки науковців (Wei et al., 2020; Li et al., 2024) доводить доцільність застосування даного варіанту удобрення у вирощуванні кукурудзи на сірих лісових ґрунтах, із застосуванням орґано-мінеральної біоорґанічної системи її удобрення.

Висновки

У загальному підсумку найменший рівень забур'яненості агроценозу кукурудзи за досягнення максимальної продуктивної

структури як індивідуальної, так і загальної зернової продуктивності отримано у варіанті поєднання бінарновидової сидерації (редька олійна + гірчиця біла) із застосуванням біодобрива Органік баланс, з отриманням таких значень просту показників морфометричної та вагової продуктивності рослин кукурудзи до контрольного варіанту: загальної ваги рослини – 17,7%, кількості качанів у розрахунку на 100 рослин – 5,9%, довжини качана – 9,7%, маси зерна

з качана – 15,5%. Це дозволило реалізувати врожайний потенціал високоінтенсивного гібрида кукурудзи ДКС 3609 у середньому за період досліджень на 68,2% (з огляду на максимально досяжний врожайний потенціал за результатами зонального конкурсного сортовипробування на рівні 12,0 т/га), забезпечило максимальний показник урожайності 8,18 т/га зі сформованим приростом до контрольного варіанту в 1,43 т/га (21,2%).

Список використаної літератури

- Badu-Apraku B., Fakorede M.A.B., Menkir A., Sanogo D. Conduct and Management of Maize Field Trials. IITA, Ibadan, 2012. 59 p.
- Berezyuk S., Pryshliak N., Zubar I. Ecological and economic problems of fertilizers application in crop production. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2021. Vol. 27. № 1. P. 29–37.
- Bublitz T.A., Kemper R., Müller P., Kautz T., Döring T.F., Athmann M. Relating Profile Wall Root-Length Density Estimates to Monolith Root-Length Density Measurements of Cover Crops. *Agronomy*. 2022. Vol. 12. P. 48. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010048>.
- Deus T.R.V., de Giongo V., Salviano A.M., Santana M. da S., Silva V.C., da Santos T.C. dos. Selection of green manures to provide ecosystem services in a semi-arid environment. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*. 2022. Vol. 57. № 3. P. 409–421. <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781268>.
- dos Santos Nascimento G., de Souza T.A.F., da Silva L.J.R. Soil physico-chemical properties, biomass production, and root density in a green manure farming system from tropical ecosystem, North-eastern Brazil. *Journal of Soils and Sediments*. 2021. Vol. 21. P. 2203–2211. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-02924-z>.
- Drescher G.L., Slaton N.A., Roberts T.L., Smartt A.D. Corn yield response to phosphorus and potassium fertilization in Arkansas. *Crop, Forage & Turfgrass Mgmt*. 2021. Vol. 7. P. e20120. <https://doi.org/10.1002/cft2.20120>.
- Duff J., van Sprang C., O'Halloran J., Hall Z. Guide to Brassica Biofumigant Cover Crops Managing soilborne diseases in vegetable production systems. Horticulture Innovation through VG16068 Optimising cover cropping for the Australian vegetable industry. State of Queensland. Department of Agriculture and Fisheries. 2020. 40 p.
- Fan F., Zhang H., Alandia G., Luo L., Cui Z., Niu X., Liu R., Zhang X., Zhang Y., Zhang F. Long-Term Effect of Manure and Mineral Fertilizer Application Rate on Maize Yield and Accumulated Nutrients Use Efficiencies in North China Plain. *Agronomy*. 2020. Vol. 10. P. 1329. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091329>.
- Gao X., He Y., Chen Y., Wang M. Leguminous green manure amendments improve maize yield by increasing N and P fertilizer use efficiency in yellow soil of the Yunnan-Guizhou Plateau. *Front. Sustain. Food Syst*. 2024. Vol. 8. P. 1369571. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1369571>.
- Gentsch N., Riechers F., Boy J., Schwenecker D., Feuerstein U., Heuermann D., Guggenberger G. Cover crops improve soil structure and change organic carbon distribution in macroaggregate fractions. *Soil*. 2024. № 10. P. 139–150. <https://doi.org/10.5194/soil-10-139-2024>.
- Honcharuk I., Tokarchuk D. Review of the European Experience of AIC Development and the Role of Green Technologies in the Modernisation of This Process. *Baltic Journal of Economic Studies*. 2024. Vol. 10. № 5. P. 155–165. <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2024-10-5-155-165>.
- Hudek C., Putinica C., Otten W., De Baets S. Functional root trait-based classification of cover crops to improve soil physical properties. *European Journal of Soil Science*. 2022. Vol. 73. № 1. P. e13147. <https://doi.org/10.1111/ejss.13147>.
- Hlushchenko L., Olepir R., Len O., Soroka Y., Saidak R. Corn for grain in continuous growing under different fertilizer systems and weather conditions. *Land Reclamation and Water Management*. 2024. № 1. P. 91–97. <https://doi.org/10.31073/mivg202401-378>.
- Kemper R. Root growth of sole and mixed cover crops in organic farming. Dissertation for the attainment of the degree Doctor of Agricultural Sciences. Institute of Crop Science and Resource Conservation. Department of Agroecology and Organic Farming. Bonn, 2024. 195 p.

- Kucerik J., Brtnicky M., Mustafa A., Hammerschmidt T., Kintl A., Sobotkova J., Alamri S., Baltazar T., Latal O., Naveed M., Malicek O., Holatko J. Utilization of Diversified Cover Crops as Green Manure-Enhanced Soil Organic Carbon, Nutrient Transformation, Microbial Activity, and Maize Growth. *Agronomy*. 2024. Vol. 14. № 9. P. 2001. <https://doi.org/10.3390/agronomy14092001>.
- Lei B., Wang J., Yao H. Ecological and Environmental Benefits of Planting Green Manure in Paddy Fields. *Agriculture*. 2022. Vol. 12. № 2. P. 223. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020223>.
- Li P., Jia L., Chen Q., Zhang H., Deng J., Lu J., Xu L., Li H., Hu F., Jiao J. Adaptive evaluation for agricultural sustainability of different fertilizer management options for a green manure-maize rotation system: Impacts on crop yield, soil biochemical properties and organic carbon fractions. *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 908. P. 168170. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020223>.
- Naher U.A., Biswas J.C., Maniruzzaman M., Khan F.H., Sarker M.I.U., Jahan A., Hera M.H.R., Hossain M.B., Islam A., Islam M.R., Kabir M.S. Bio-Organic Fertilizer: A Green Technology to Reduce Synthetic N and P Fertilizer for Rice Production. *Frontiers in Plant Science*. 2021. № 12. P. 602052. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.602052>.
- Olfs H.-W. Organic Fertilization in Maize Cropping Systems: Measures to Reduce N Losses. *Agronomy*. 2021. Vol. 11. P. 793. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040793>.
- Pál V., Zsombik L. Effect of Common Vetch (*Vicia sativa* L.) Green Manure on the Yield of Corn in Crop Rotation System. *Agronomy*. 2024. Vol. 14. P. 19. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010019>.
- Pimentel M.L., Reis I.M.S., Romano M.L.P.C., de Castro J.S., Vildoso C.I.A., Gasparin E., de Sia E.F., de Sousa L.S. Green manure, a sustainable strategy to improve soil quality: A case study in an oxisol from Northern Brazil. *Australian Journal of Crop Science*. 2023. Vol. 17. № 6. P. 488–497. <https://doi.org/10.21475/ajcs.23.17.06.p3832>.
- Qi Z., Liu C., Wang Y., Zhang Z., Sun X. Design and Experimentation of Targeted Deep Fertilization Device for Corn Cultivation. *Agriculture*. 2024. Vol. 14. P. 1645. <https://doi.org/10.3390/agriculture14091645>.
- Saleem M., Pervaiz Z.H., Contreras J., Lindenberger J.H., Hupp B.M., Chen D., Zhang Q., Wang C., Iqbal J., Twigg P. Cover crop diversity improves multiple soil properties via altering root architectural traits. *Rhizosphere*. 2020. Vol. 16. P. 100248. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100248>.
- Tokarchuk D., Pryshliak N., Berezyuk S., Tokarchuk O. Advancing sustainable reconstruction in Ukraine after full scale invasion: utilizing a “green” economic approach and essential guidelines for successful implementation. *Polityka Energetyczna*. 2024. Vol. 27. № 2. P. 71–88. <https://doi.org/10.33223/epj/185209>.
- Tsytsiura Y. Potential of oilseed radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) as a multi-service cover crop (MSCC). *Agronomy Research*. 2024a. Vol. 22. № 2. P. 1026–1070. <https://doi.org/10.15159/AR.24.086>.
- Tsytsiura Y. Evaluation of Ecological Adaptability of Oilseed Radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) Biopotential Realization in the System of Criteria for Multi-Service Cover Crop. *Journal of Ecological Engineering*. 2024b. Vol. 25. Iss. 7. P. 265–285. <https://doi.org/10.12911/22998993/188603>.
- Wang Y., Cao Y., Feng G., Li X., Zhu L., Liu S., Coulter J.A., Gao Q. Integrated Soil – Crop System Management with Organic Fertilizer Achieves Sustainable High Maize Yield and Nitrogen Use Efficiency in Northeast China Based on an 11-Year Field Study. *Agronomy*. 2020. Vol. 10. P. 1078. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081078>.
- Wei Z., Ying H., Guo X., Zhuang M., Cui Z., Zhang F. Substitution of Mineral Fertilizer with Organic Fertilizer in Maize Systems: A Meta-Analysis of Reduced Nitrogen and Carbon Emissions. *Agronomy*. 2020. Vol. 10. P. 1149. <http://doi.org/10.3390/agronomy10081149>.
- Wong J. Handbook of statistical analysis and data mining applications. Cambridge : Academic Press, 2018, 589 p. <http://doi.org/10.1016/C2012-0-06451-4>.

References

- Badu-Apraku, B., Fakorede, M.A.B., Menkir, A., & Sanogo, D. (2012). Conduct and Management of Maize Field Trials. IITA, Ibadan, 59 pp. [in English].
- Berezyuk, S., Pryshliak, N., & Zubar, I. (2021). Ecological and economic problems of fertilizers application in crop production. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 27 (1), 29–37 [in English].

- Bublitz, T.A., Kemper, R., Müller, P., Kautz, T., Döring, T.F., & Athmann, M. (2022). Relating Profile Wall Root-Length Density Estimates to Monolith Root-Length Density Measurements of Cover Crops. *Agronomy*, 12, 48. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010048> [in English].
- Deus, T.R.V. de Giongo, V., Salviano, A.M., Santana, M. da S., Silva, V.C., & da Santos, T.C. dos (2022). Selection of green manures to provide ecosystem services in a semi-arid environment. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 57 (3), 409–421. <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781268> [in English].
- dos Santos Nascimento, G., de Souza, T.A.F., & da Silva, L.J.R. (2021). Soil physico-chemical properties, biomass production, and root density in a green manure farming system from tropical ecosystem, North-eastern Brazil. *Journal of Soils and Sediments*, 21, 2203–2211. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-02924-z> [in English].
- Drescher, G.L., Slaton, N.A., Roberts, T.L., & Smartt, A.D. (2021). Corn yield response to phosphorus and potassium fertilization in Arkansas. *Crop, Forage & Turfgrass Mgmt.* 7, e20120. <https://doi.org/10.1002/cft2.20120> [in English].
- Duff, J., van Sprang, C., O'Halloran, J., & Hall, Z. (2020). Guide to Brassica Biofumigant Cover Crops Managing soilborne diseases in vegetable production systems. Horticulture Innovation through VG16068 Optimising cover cropping for the Australian vegetable industry. State of Queensland. Department of Agriculture and Fisheries [in English].
- Fan, F., Zhang, H., Alandia, G., Luo, L., Cui, Z., Niu, X., Liu, R., Zhang, X., Zhang, Y., & Zhang, F. (2020). Long-Term Effect of Manure and Mineral Fertilizer Application Rate on Maize Yield and Accumulated Nutrients Use Efficiencies in North China Plain. *Agronomy*, 10, 1329. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091329> [in English].
- Gao, X., He, Y., Chen, Y., & Wang, M. (2024). Leguminous green manure amendments improve maize yield by increasing N and P fertilizer use efficiency in yellow soil of the Yunnan-Guizhou Plateau. *Front. Sustain. Food Syst.*, 8, 1369571. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1369571> [in English].
- Gentsch, N., Riechers, F., Boy, J., Schwenecker, D., Feuerstein, U., Heuermann, D., & Guggenberger, G. (2024). Cover crops improve soil structure and change organic carbon distribution in macroaggregate fractions. *Soil*, 10, 139–150 <https://doi.org/10.5194/soil-10-139-2024> [in English].
- Honcharuk, I., & Tokarchuk, D. (2024). Review of the European Experience of AIC Development and the Role of Green Technologies in the Modernisation of This Process. *Baltic Journal of Economic Studies*, 10 (5), 155–165. <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2024-10-5-155-165> [in English].
- Hudek, C., Putinica, C., Otten, W., & De Baets, S. (2022). Functional root trait-based classification of cover crops to improve soil physical properties. *European Journal of Soil Science*, 73 (1), e13147. <https://doi.org/10.1111/ejss.13147> [in English].
- Hlushchenko, L., Olepir, R., Len, O., Soroka, Y., & Saidak, R. (2024). Corn for grain in continuous growing under different fertilizer systems and weather conditions. *Land Reclamation and Water Management*, 1, 91–97. <https://doi.org/10.31073/mivg202401-378> [in English].
- Kemper, R. (2024). Root growth of sole and mixed cover crops in organic farming. Dissertation for the attainment of the degree Doctor of Agricultural Sciences. Institute of Crop Science and Resource Conservation. Department of Agroecology and Organic Farming. Bonn [in English].
- Kucerik, J., Brtnicky, M., Mustafa, A., Hammerschmidt, T., Kintl, A., Sobotkova, J., Alamri, S., Baltazar, T., Latal, O., Naveed, M., Malicek, O., & Holatko, J. (2024). Utilization of Diversified Cover Crops as Green Manure-Enhanced Soil Organic Carbon, Nutrient Transformation, Microbial Activity, and Maize Growth. *Agronomy*, 14 (9), 2001. <https://doi.org/10.3390/agronomy14092001> [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].
- Li, P., Jia, L., Chen, Q., Zhang, H., Deng, J., Lu, J., Xu, L., Li, H., Hu, F., & Jiao, J. (2024). Adaptive evaluation for agricultural sustainability of different fertilizer management options for a green manure-maize rotation system: Impacts on crop yield, soil biochemical properties and organic carbon fractions. *Science of The Total Environment*, 908, 168170. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168170> [in English].
- Naher, U.A., Biswas, J.C., Maniruzzaman, M., Khan, F.H., Sarker, M.I.U., Jahan, A., Hera, M.H.R., Hossain, M.B., Islam, A., Islam, M.R., & Kabir, M.S. (2021). Bio-Organic Fertilizer: A Green Technology to Reduce Synthetic N and P Fertilizer for Rice Production. *Frontiers in Plant Science*, 12, 602052. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.602052> [in English].
- Olf, H.-W. (2021). Organic Fertilization in Maize Cropping Systems: Measures to Reduce N Losses. *Agronomy*, 11, 793. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040793> [in English].

- Pál, V., & Zsombik, L. (2024). Effect of Common Vetch (*Vicia sativa* L.) Green Manure on the Yield of Corn in Crop Rotation System. *Agronomy*, 14, 19. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010019> [in English].
- Pimentel, M.L., Reis, I.M.S., Romano, M.L.P.C., de Castro, J.S., Vildoso, C.I.A., Gasparin, E., de Sia, E.F., & de Sousa, L.S. (2023). Green manure, a sustainable strategy to improve soil quality: A case study in an oxisol from Northern Brazil. *Australian Journal of Crop Science*, 17(6), 488–497. <https://doi.org/10.21475/ajcs.23.17.06.p3832> [in English].
- Qi, Z., Liu, C., Wang, Y., Zhang, Z., Sun, X. (2024). Design and Experimentation of Targeted Deep Fertilization Device for Corn Cultivation. *Agriculture*, 14, 1645. <https://doi.org/10.3390/agriculture14091645> [in English].
- Saleem, M., Pervaiz, Z.H., Contreras, J., Lindenberger, J.H., Hupp, B.M., Chen, D., Zhang, Q., Wang, C., Iqbal, J., & Twigg, P. (2020). Cover crop diversity improves multiple soil properties via altering root architectural traits. *Rhizosphere*, 16, 100248. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100248> [in English].
- Tokarchuk, D., Pryshliak, N., Berezyuk, S., & Tokarchuk, O. (2024). Advancing sustainable reconstruction in Ukraine after full scale invasion: utilizing a “green” economic approach and essential guidelines for successful implementation. *Polityka Energetyczna*, 27 (2), 71–88. <https://doi.org/10.33223/epj/185209> [in English].
- Tsytsiura, Y. (2024a). Potential of oilseed radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) as a multi-service cover crop (MSCC). *Agronomy Research*, 22 (2), 1026–1070. <https://doi.org/10.15159/AR.24.086> [in English].
- Tsytsiura, Y. (2024b). Evaluation of Ecological Adaptability of Oilseed Radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) Biopotential Realization in the System of Criteria for Multi-Service Cover Crop. *Journal of Ecological Engineering*, 25 (7), 265–285. <https://doi.org/10.12911/22998993/188603> [in English].
- Wang, Y., Cao, Y., Feng, G., Li, X., Zhu, L., Liu, S., Coulter, J.A., Gao, Q. (2020). Integrated Soil – Crop System Management with Organic Fertilizer Achieves Sustainable High Maize Yield and Nitrogen Use Efficiency in Northeast China Based on an 11-Year Field Study. *Agronomy*, 10, 1078. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081078> [in English].
- Wei, Z., Ying, H., Guo, X., Zhuang, M., Cui, Z., & Zhang, F. (2020). Substitution of Mineral Fertilizer with Organic Fertilizer in Maize Systems: A Meta-Analysis of Reduced Nitrogen and Carbon Emissions. *Agronomy*, 10, 1149. <http://doi.org/10.3390/agronomy10081149> [in English].
- 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: 25.04.2025
Прийнято: 15.05.2025



УДК 631.527.5:633.11

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.27>

ПРОДУКТИВНІСТЬ СОРТІВ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ ЗАЛЕЖНО ВІД РІВНЯ АЗОТНОГО ПІДЖИВЛЕННЯ НА ПІВДНІ УКРАЇНИ

А. В. Шепель¹

У сучасних аграрних умовах України, особливо в Південному регіоні, де спостерігається нестабільність кліматичних умов, посухи, дефіцит ґрунтової вологи та високі температури, постає необхідність удосконалення технологій вирощування пшениці озимої як провідної зернової культури.

Раціональне застосування мінерального живлення, зокрема азотних добрив, є ключовим фактором, що визначає рівень урожайності та якості зерна. Проте сучасна практика показує, що загальні підходи до удобрення часто не враховують сортових особливостей культур, їхньої реакції на азотне живлення і адаптивність до специфічних умов регіону. У цьому контексті актуальним є визначення оптимального рівня азотного підживлення для поширених сортів пшениці озимої, здатного забезпечити максимальну продуктивність за умов Півдня України.

Метою дослідження є встановлення впливу різних рівнів азотного підживлення на продуктивність поширених сортів пшениці озимої в агрокліматичних умовах Південного регіону України, з метою визначення найбільш ефективних агротехнічних прийомів для підвищення врожайності та покращення якості зерна.

Методи аналізу проблеми включали польові дослідження на дослідних ділянках із застосуванням різних норм унесення азотних добрив (від нульового фону до підвищених, у сучасних умовах, доз), аналіз біометричних показників рослин, визначення врожайності, лабораторне дослідження якісних показників зерна. Статистична обробка результатів проводилась із використанням методу дисперсійного аналізу для визначення достовірності отриманих даних.

Результати дослідження засвідчили, що рівень азотного підживлення має значний вплив на формування врожайності пшениці озимої. Встановлено, що для окремих сортів оптимальними є середні дози азоту (N30), які забезпечують високу врожайність за умов помірного зволоження. Зі збільшенням дози добрив до N60 відзначається підвищення показників вмісту білка та натюри зерна, однак економічну ефективність такої дози потрібно перевіряти. Найкращі результати щодо продуктивності та якості зерна показали сорти, які поєднують високу потенційну врожайність і адаптивність до стресових умов.

Наукова новизна полягає у виявленні сортоспецифічної реакції на рівень азотного підживлення в неpolивних умовах Південного Степу України, що дозволяє обґрунтувати диференційований підхід до удобрення залежно від біологічних особливостей сорту. Також дослідження дало можливість виявити оптимальні комбінації «сорт – рівень підживлення», які забезпечують найвищу ефективність за врожайністю та якістю.

Практична значущість результатів полягає в тому, що вони можуть бути безпосередньо вико-

¹ кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри землеробства
(Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон)
e-mail: andrey.inessa_shepel@ukr.net
ORCID: 0000-0002-9955-4569

ристані у виробничій практиці аграрними підприємствами Південного регіону України, особливо зараз, коли площі зрошуваних земель стрімко зменшились. Запропоновані норми азотного підживлення дозволяють не лише отримувати стабільно високі врожаї, але й забезпечують економічну доцільність використання мінеральних добрив, зменшують собівартість і підвищують конкурентоспроможність продукції.

Ключові слова: пшениця озима, сорти, дози азотного підживлення, урожайність, якість зерна.

PRODUCTIVITY OF WINTER WHEAT VARIETIES DEPENDING ON THE LEVEL OF NITROGEN FERTILIZATION IN THE SOUTH OF UKRAINE

A. V. Shepel

In the current agricultural conditions of Ukraine, particularly in the southern region, where there is instability in climatic conditions, droughts, soil moisture deficits, and high temperatures, there is a need to improve the technologies for growing winter wheat, the leading cereal crop. Rational use of mineral nutrition, especially nitrogen fertilizers, is a key factor determining the yield level and grain quality. However, current practices show that general approaches to fertilization often do not take into account the varietal characteristics of crops, their response to nitrogen nutrition, and adaptability to the specific conditions of the region. In this context, it is crucial to determine the optimal level of nitrogen fertilization for widely used varieties of winter wheat that can ensure maximum productivity in the conditions of Southern Ukraine.

The aim of the research is to establish the impact of different levels of nitrogen fertilization on the productivity of widely used varieties of winter wheat in the agro-climatic conditions of the southern region of Ukraine, with the goal of determining the most effective agronomic practices to increase yield and improve grain quality.

The methods of problem analysis included field studies on experimental plots with the application of different nitrogen fertilizer rates (from zero background to increased modern doses), analysis of biometric indicators of plants, determination of yield, and laboratory analysis of the quality indicators of the grain. Statistical processing of the results was carried out using the method of variance analysis to determine the reliability of the obtained data.

The research results showed that the level of nitrogen fertilization has a significant impact on the formation of winter wheat yield. It was found that for certain varieties, optimal nitrogen doses are medium rates (N_{30}), which provide high yields under moderate moisture conditions. With an increase in the fertilizer dose to N_{60} , there is an increase in protein content and grain density indicators, but the economic efficiency of this dose needs to be verified. The best results for productivity and grain quality were demonstrated by varieties that combine high potential yield and adaptability to stressful conditions.

The scientific novelty lies in identifying the varietal-specific response to the level of nitrogen fertilization in the non-irrigated conditions of the Southern Steppe of Ukraine, which allows for a differentiated approach to fertilization based on the biological characteristics of the variety. The research also allowed for identifying optimal "variety – fertilization level" combinations that provide the highest efficiency in terms of yield and quality.

The practical significance of the results lies in the fact that they can be directly applied in the production practices of agricultural enterprises in the southern region of Ukraine, especially now when the area of irrigated land has been rapidly decreasing. The proposed nitrogen fertilization rates not only allow for obtaining consistently high yields but also ensure the economic feasibility of using mineral fertilizers, reducing production costs, and increasing the competitiveness of the product.

Key words: winter wheat, varieties, nitrogen fertilization rates, yield, grain quality.

Вступ

Пшениця озима є однією з головних зернових культур України, відіграє ключову роль у досягненні продовольчої безпеки країни та формуванні експортного потенціалу. У Південному регіоні України, де, з одного боку, агрокліматичні умови є складними через нестачу вологи, високу температуру та часті посухи, а з іншого – висока тем-

пература сухого повітря забезпечує отримання високоякісного зерна культури, особливо важливо забезпечити максимальну продуктивність посівів завдяки раціональному застосуванню агротехнічних заходів. Одним із найважливіших чинників впливу на врожайність озимої пшениці є азотне підживлення. Водночас надмірне або нераціональне застосування азотних добрив

може призводити до зниження рентабельності виробництва та негативного впливу на довкілля. Тому дослідження оптимальних норм і строків внесення азотних добрив залежно від сортових особливостей пшениці озимої є надзвичайно актуальним для підвищення ефективності виробництва культури в умовах Півдня України. Дослідження науковців (Влашук та ін., 2020), проведене в Інституті зрошуваного землеробства Національної академії аграрних наук України, показало, що застосування азотних добрив у дозах N60 – N90 забезпечує підвищення врожайності та покращення якісних показників зерна пшениці озимої в умовах Південного Степу України. Згідно з дослідженням (Лубенець, 2021), проведеним у Дніпровському державному аграрно-економічному університеті, роздільне внесення мінеральних добрив по вегетуючих посівах сприяло збільшенню врожайності пшениці озимої до 5,0 т/га та забезпечило найвищу рентабельність – 148,2%. Дослідження (Попов і Авраменко, 2024) виявило, що осіннє внесення азотних добрив у дозах N30 – N60 після попередника соняшнику сприяло істотному підвищенню врожайності пшениці озимої. Дослідження (Золотухіна, 2015) присвячені вивченню процесів формування врожайності та якості зерна інтенсивними сортами пшениці озимої під впливом регуляторів росту та різних рівнів азотного підживлення, що підкреслює важливість комплексного підходу до живлення рослин.

У метааналізі, опублікованому у виданні “Frontiers in Plant Science”, дослідники (Yokamo et al., 2022) виявили, що азотне удобрення значно підвищує врожайність пшениці, причому максимальне збільшення спостерігається за доз 150–300 кг/га. Вони також підкреслили важливість кліматичних умов і властивостей ґрунту для ефективності азотного живлення. Дослідження науковців (Burton et al., 2024) опубліковане в журналі “Field Crops Research”, показало, що режим внесення азоту в дозах 40–40–80 кг/га може максимізувати як урожайність, так і вміст азоту в зерні. Дослідники (Martre et al., 2024) з Технічного університету Мюнхена (TUM) та Французького національного інституту сільськогосподарських досліджень (INRAE) виявили, що нові експериментальні сорти пшениці можуть давати на 16% більший урожай за тих самих умов унесення добрив, завдяки покращеному використанню азоту. Власні результати

представили у глобальному метааналізі, який опублікований в Agricultural Water Management (Hu et al., 2021), де стверджували, що роздільне внесення азоту у 3–4 прийоми підвищує врожайність пшениці на 7% та вміст білка в зерні на 5%. Дослідження науковців (Subbarao et al., 2021) JIRCAS та CIMMYT привело до розроблення сортів пшениці з підвищеною здатністю до біологічного інгібування нітрифікації, що дозволяє зменшити потребу в азотних добривах без зниження врожайності. Загалом, наукові публікації свідчать про те, що оптимізація рівня та строків внесення азотних добрив, урахування сортових особливостей і використання регуляторів росту є ключовими чинниками для підвищення продуктивності та якості зерна пшениці озимої в умовах Півдня України. Незважаючи на наявні наукові роботи щодо впливу мінерального живлення на продуктивність зернових культур, у сучасних умовах зростає потреба в оновленні рекомендацій з урахуванням змін клімату, появи нових сортів пшениці озимої та сучасних підходів до удобрення. У Південному регіоні України актуальним є питання адаптації сортів до екстремальних погодних умов і забезпечення їх високої продуктивності за оптимального рівня мінерального живлення. Проблема полягає в тому, що не досить вивчені особливості реакції сучасних сортів пшениці озимої на різні рівні азотного підживлення саме в умовах Півдня України.

Мета наших досліджень – оптимізувати та рекомендувати товаровиробникам зерна пшениці на півдні України прийоми збільшення врожайності та поліпшення якості зерна сортів пшениці озимої на основі застосування азотного локального підживлення.

Для досягнення поставленої мети програмою досліджень передбачалось вирішення таких завдань:

установити особливості росту, розвитку рослин залежно від рівня азотного підживлення;

виявити вплив рівня азотного живлення на формування продуктивного потенціалу в різних сортах пшениці озимої;

оцінити основні чинники впливу на підвищення показників якості зерна пшениці озимої в умовах браку зволоження Південного Степу України.

Матеріал і методи

Польовий дослід закладали та проводили у 2023–2024 сільськогосподарському році. Попередником пшениці озимої був

чорний пар, що розміщувався після соняшнику. Після збирання соняшнику здійснювали якісне подрібнення рослинних решток мульчувавачем польовим навісним "Agromehanika FPM RM-280" (Сербія). На початку жовтня проводили зяблеву оранку на глибину 25–27 см. Догляд за чорним паром був спрямований на максимальне збереження вологи у ґрунті та знищення бур'янів. Навесні, за настання фізичної стиглості ґрунту, чорний пар боронували зубовими боровами. Надалі застосовували різноглибинні культивачі з боронуванням з метою знищення бур'янів і руйнування ґрунтової кірки, яка іноді утворювалася після зливових дощів. Сівбу культури проводили в I декаду жовтня нормою висіву 4,5 млн схожого насіння на 1 га. Дослідження проводили у двофакторному польовому досліді, схема якого представлена в результатах нашого дослідження.

Результати

Наші дослідження показали, що удобрені навесні рослини пшениці озимої формували більшу фотосинтетичну поверхню порівняно з неудобреними. Так, максимальна площа листків формувалася в посівах пшениці озимої в період від кінця фази виходу у трубку до початку колосіння (табл. 1).

У цей час підживлення рослин сорту Ужинок азотом дозами 30 і 60 кг/га д. р. сприяло формуванню асиміляційної поверхні 44,4 та 50,8 тис. м²/га, що було на 2,6 та на 9,0 тис. м² більше, ніж у варіанті

без підживлення. Рослини сорту Благодарка одеська та Косовиця утворювали дещо меншу площу листків, що також, залежно від дози азоту, становило 40,1 і 44,7 та 38,7 і 49,7 тис. м²/га відповідно. Починаючи з фази колосіння, основна роль у постачанні колоса асимілянтами належить двом верхнім листкам чи навіть одному верхньому (прапорцевому), унаслідок чого в наступні фази розвитку площа листової поверхні рослин поступово зменшується, у фазі молочної стиглості зерна наближається за значеннями до показників весняного кушіння – 27,1–38,3 тис. м²/га. Під час молочної і воскової стиглості зерна площа листової поверхні, як і на початкових фазах росту, була більшою в сорту Ужинок.

Обговорення

Результати проведених нами досліджень свідчать, що різні біологічні властивості сортів забезпечували специфічну їх реакцію за тих чи інших агротехнічних умов, яка проявлялася у формуванні різної продуктивності (табл. 2).

Максимальна врожайність зерна культури була отримана у пшениці озимої сорту Ужинок, яка залежно від прийомів вирощування, що вивчалися в досліді, коливалася від 5,53 до 6,23 т/га. Мінімальну врожайність сформував сорт Косовиця, величина якої коливалася від 4,46 до 5,21 т/га, що було на 1,02–1,13 та 0,43–0,65 т/га менше, ніж відповідно в сортів Ужинок і Благодарка одеська, за однакових умов їх вирощу-

Таблиця 1

Динаміка зміни площі листової поверхні на посівах сортів пшениці озимої залежно від рівня азотного підживлення (2023–2024 с.-г. р.)

Сорти	Дози азоту кг/га	Площа листків у фазі, тис. м ² /га			
		відновлення весняної вегетації	вихід у трубку	колосіння	молочна стиглість
Ужинок	0	20,5	37,2	41,8	27,5
	30		39,4	44,4	36,5
	60		46,7	50,8	38,3
Благодарка одеська	0	28,6	30,8	32,2	28,4
	30		33,9	40,1	33,1
	60		39,1	44,7	36,0
Косовиця	0	26,2	32,7	35,4	27,1
	30		34,3	38,7	29,3
	60		37,9	49,7	34,2
НІР ₀₅ , тис. м ² /га для:	сортів	0,9	1,8	2,0	1,7
	добрив		1,8	2,0	1,7
	взаємодії		3,8	3,3	3,8

Джерело: власні дослідження автора.

Таблиця 2
Урожайність сортів пшениці озимої
залежно від рівня азотного підживлення,
т/га (2023–2024 с.-г. р.)

Сорти	Дози азотного добрива, кг/га д. р.		
	0	30	60
Ужинок	5,53	6,05	6,23
Благодарка одеська	5,11	5,45	5,64
Косовиця	4,46	4,92	5,21
NIP ₀₅ , т/га для:	сортів	0,13	–
	добрив	0,13	–
	взаємодії	0,20	–

Джерело: власні дослідження автора.

вання. Найсуттєвіше збільшення врожайності спостерігалось за внесення азотного добрива в дозі N₆₀ у підживлення рослин пшениці озимої на початку фази виходу у трубку. Цей агротехнічний захід сприяв підвищенню врожайності в середньому по сортах на 0,66 т/га, тоді як унесення N₃₀ збільшувало його лише на 0,44 т/га, порівняно з варіантом, де добрива в підживлення не застосовували взагалі. Приріст врожаю зерна пшениці озимої сорту Ужинок від унесення 30 кг/га азоту становив 0,52 т/га, а за внесення 60 кг/га – 0,70 т/га. У таких

сортів, як Благодарка одеська та Косовиця, ці показники зростали лише на 0,34 і 0,53 та 0,46 і 0,75 т/га відповідно.

У поліпшенні якості зерна пшениці озимої важливе місце належить як агротехнічним, так і екологічним чинникам. Найбільший вплив на накопичення білка, клейковини й інших цінних речовин у зерні мають попередники, мінеральні добрива, сортові особливості тощо. Аналіз літературних джерел показує, що ефективність цього агротехнічного заходу залежить від багатьох чинників, найголовнішими з яких є рівень забезпеченості ґрунту елементами живлення, погодні умови року, сортові особливості й інші.

Внесення азотних добрив є одним з основних елементів технології вирощування пшениці озимої, що передбачає застосування їх як локально, так і позакореневим способом, поряд із використанням інтегрованої системи захисту посівів із метою стабільного отримання високих урожаїв якісного зерна. Отримані експериментальні дані показують, що якість зерна пшениці озимої за період проведення досліджень залежала від технологічних прийомів її вирощування, особливостей сорту та підживлення (рис. 1, 2).

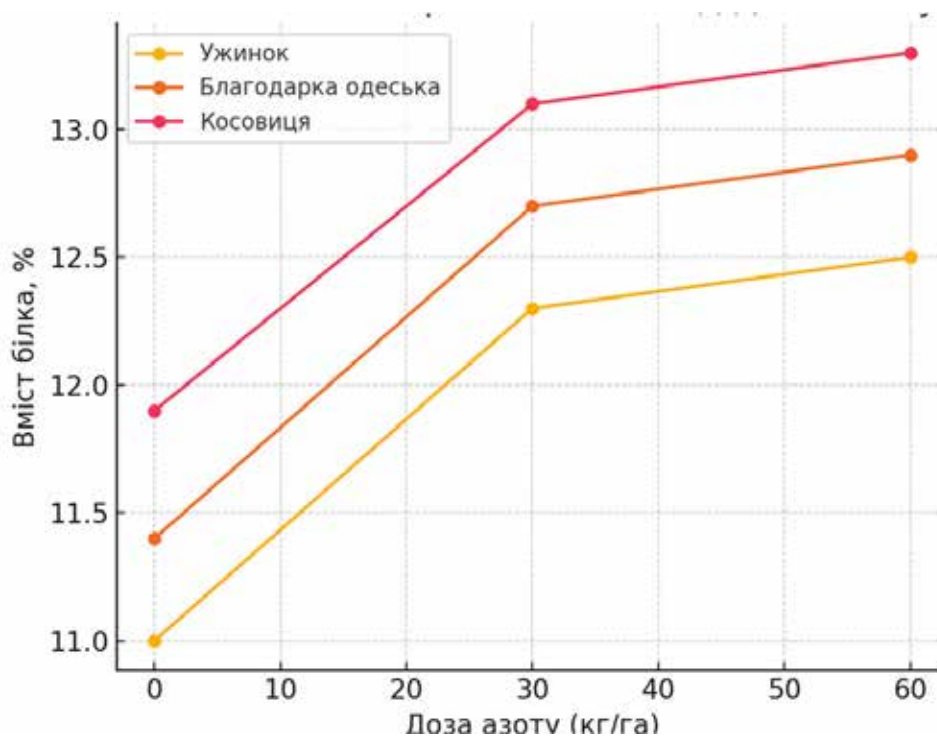


Рис. 1. Вміст білка в зерні залежно від дози азоту

Джерело: власні дослідження автора.

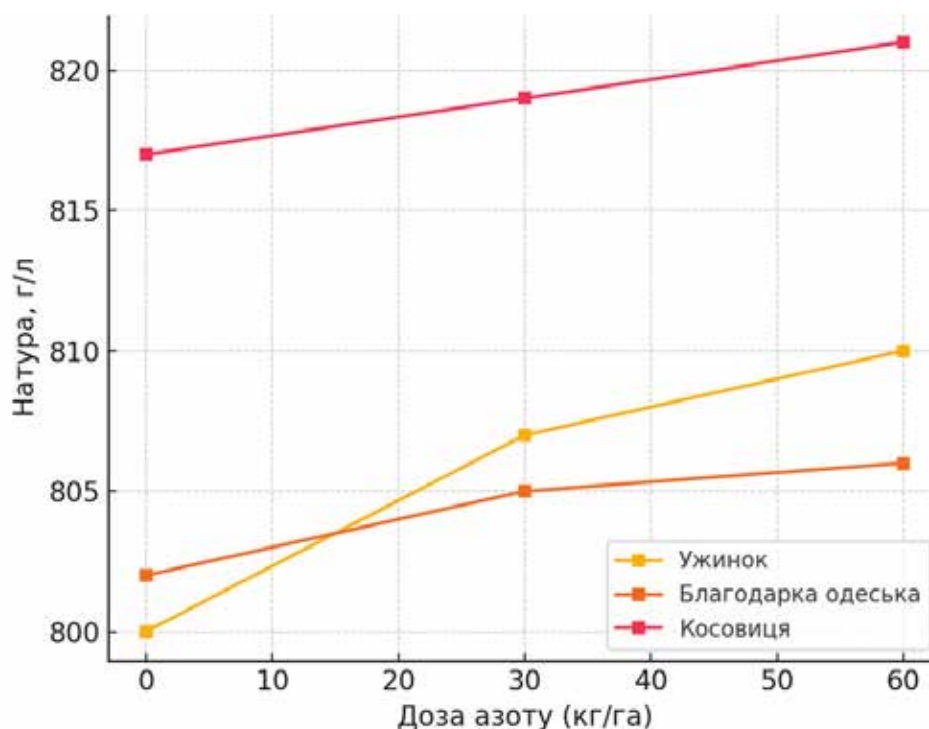


Рис. 2. Натура зерна залежно від дози азоту

Джерело: власні дослідження автора.

Фізіологічні процеси наливу зерна та його досягання проходили за підвищеного температурного режиму, посушливої погоди, низької відносної вологості повітря, що сприяло покращанню якості зерна. Так, локальне внесення 30 та 60 кг/га д. р. азоту сприяло збільшенню вмісту білка в зерні в сорту Ужинок на 1,3 та 1,5 в. п., сорту Благодарка одеська – на 1,3 та 1,5 в. п., сорту Косовиця – на 1,2 та 1,4 в. п., порівняно з контрольним варіантом, де підживлення не застосовували.

Встановлено, що найбільшим умістом білка в зерні характеризувалися сорти Благодарка одеська та Косовиця – 12,9 та 13,3%, дещо менша його кількість була в сорту Ужинок (12,5%). Використання азотних підживлень позитивно впливало також на показники натури зерна різних сортів пшениці озимої, що змінювалася залежно від сортових особливостей від 800 г/л у сорту Ужинок до 821 г/л у сорту Косовиця. Так, унесення локально 30 і 60 кг/га азоту сприяло збільшенню натури зерна в сорту Ужинок на 7 і 10 г/л,

у сорту Благодарка одеська – на 3 і 4 г/л, сорту Косовиця – на 2 і 4 г/л відповідно.

Висновки

У нашому досліді максимальна врожайність зерна пшениці озимої по попереднику пар чорний була отримана в сорту Ужинок, яка, залежно від рівня азотного підживлення, коливалася від 5,53 до 6,23 т/га. Мінімальну врожайність сформував сорт Косовиця, величина якої коливалася від 4,46 до 5,21 т/га. Максимальне збільшення врожайності спостерігалось за внесення азотного добрива в дозі N_{60} у підживлення на всіх сортах. Цей агротехнічний захід сприяв підвищенню врожайності в середньому по сортах на 0,66 т/га, тоді як унесення N_{30} збільшувало його лише на 0,44 т/га, порівняно з контрольним варіантом. Приріст урожаю зерна пшениці озимої сорту Ужинок від унесення 30 кг/га азоту становив 0,52 т/га, а від унесення 60 кг/га – 0,70 т/га. У таких сортів, як Благодарка одеська та Косовиця, ці показники зростали лише на 0,34 і 0,53 та 0,46 і 0,75 т/га відповідно.

Список використаної літератури

Влашук А.М., Марченко Т.Ю., Дробіт О.С. Продуктивність пшениці озимої в умовах Південного Степу України. *AgroONE*. 2020. № 61. С. 30–33.

Золотухіна З.В. Продуктивність та якість зерна інтенсивних сортів пшениці озимої залежно від агротехнічних прийомів вирощування в умовах Південного Степу України. 2015

[Електронний ресурс]. URL: <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/7625> (дата звернення: 02.04.2025).

Лубенець В.В. Вплив рівня азотного живлення на формування зернової продуктивності пшениці озимої в умовах фермерського господарства «Агроланка» Синельниківського району Дніпропетровської області. 2021 [Електронний ресурс]. URL: https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/4236/1/%D0%9B%D1%83%D0%B1%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%86%D1%8C%20%20%D0%92.%D0%92.%20%28pdf.io%29.pdf?utm_source (дата звернення: 02.04.2025).

Попов Ю. В., Авраменко С. В. Вплив осіннього внесення різних доз та видів азотних добрив на врожайність пшениці озимої після попередника соняшнику. *Селекція і насінництво*. 2024. № 125. С. 94–101.

Burton A., Lev H.L., Schaad N., Strebel S., Vuille-dit-Bille N., de Figueiredo Bongiovani P., Holzkamper A., Pellet D., Herrera J.M. Evaluating nitrogen fertilization strategies to optimize yield and grain nitrogen content in top winter wheat varieties across Switzerland. *Field Crops Research*. 2024. Vol. 307. P. 2–15.

Hu C., Sadras V.O., Lu G., Zhang P., Han Y., Liu L., Xie J., Yang X., Zhang S. A global meta-analysis of split nitrogen application for improved wheat yield and grain protein content. *Soil and Tillage Research*. Elsevier, September 2021. Vol. 213. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105111>.

Martre P., Dueri S., Guarin J.R. Global needs for nitrogen fertilizer to improve wheat yield under climate change. *Nat Plants*. 2024. Vol. 10 (7). P. 1081–1090. <https://doi.org/10.1038/s41477-024-01739-3>.

Subbarao G.V., Kishii M., Bozal-Leorri A., Orits-Monesterio I., Gao X., Ibba M.I., Karwat H., Gonzalez-Moro M.B., Gonzalez-Murua C., Yoshihashi T., Tobita S., Kommerell V., Braun H.J., Iwanaga M. World's first successful development of wheat that shows high productivity with less nitrogen fertilizer – Use of ammonium to prevent nitrogen pollution and increase food production at the same time. 2021. *Proceedings of the National Academy of Sciences of United States of America (PNAS)*. <https://doi.org/10.1073/pnas.2106595118>.

Yokamo S., Irfan M., Huan W., Wang B., Wang Y., Ishfaq M., Lu D., Chen X., Cai Q., Wang H. Global evaluation of key factors influencing nitrogen fertilization efficiency in wheat: a recent meta-analysis (2000–2022). Systematic review article *Front. Plant Sci.*, 30 October 2023. *Sec. Plant Nutrition*. 2023. Vol. 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1272098>.

References

Vlashchuk, A.M., Marchenko, T.Iu., & Drobit, O.S. (2020). Produktivnist pshenytsi ozymoi v umovakh Pivdennoho stepu Ukrainy [Productivity of winter wheat under the conditions of the southern steppe of Ukraine]. *AgroONE [AgroONE]*, 61, 30–33 [in Ukrainian].

Zolotukhina, Z.V. (2015). Produktivnist ta yakist zerna intensyvnykh sortiv pshenytsi ozymoi zalezchno vid ahrotekhnichnykh pryimiv vyroshchuvannya v umovakh Pivdennoho Stepu Ukrainy [Productivity and Grain Quality of Intensive Winter Wheat Varieties Depending on Agricultural Practices under the Conditions of the Southern Steppe of Ukraine]. [Electronic resource] URL: <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/7625> (access date 02.04.2025) [in Ukrainian].

Lubenets, V.V. (2021). Vplyv rivnia azotnoho zhyvlennia na formuvannya zernovoi produktivnosti pshenytsi ozymoi v umovakh fermerskoho hospodarstva “Ahrolanka” Synelnykivskoho raionu Dnipropetrovskoi oblasti [The Influence of Nitrogen Nutrition Levels on the Formation of Grain Productivity of Winter Wheat under the Conditions of the “Agrolanka” Farm in Synelnykove District, Dnipropetrovsk Region]. [Electronic resource] URL: https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/4236/1/%D0%9B%D1%83%D0%B1%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%86%D1%8C%20%20%D0%92.%D0%92.%20%28pdf.io%29.pdf?utm_source (access date 02.04.2025) [in Ukrainian].

Popov, Yu.V., & Avramenko, S.V. (2024). Vplyv osinnoho vnesennia riznykh doz ta vydiv azotnykh dobryv na urozhainist pshenytsi ozymoi pislia poperednyka soniashnyk. Seleksiia i nasinnystvo [The Influence of Autumn Application of Different Rates and Types of Nitrogen Fertilizers on the Yield of Winter Wheat Following Sunflower as a Preceding Crop]. *Seleksiia i nasinnystvo [Plant breeding and seed production]*, 125, 94–101. <https://doi.org/10.30835/2413-7510.2024.306975> [in Ukrainian].

Burton, A., Lev, H.L., Schaad, N., Strebel, S., Vuille-dit-Bille, N., de Figueiredo Bongiovani, P., Holzkamper, A., Pellet, D., & Herrera, J.M. (2024). Evaluating nitrogen fertilization strategies to optimize yield and grain nitrogen content in top winter wheat varieties across Switzerland. *Field Crops Research*, 307, 2–15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109251> [in English].

Hu, C., Sadras, V.O., Lu, G., Zhang, P., Han, Y., Liu, L., Xie, J., Yang, X., & Zhang, S. (2021). A global meta-analysis of split nitrogen application for improved wheat yield and grain protein content. *Soil and Tillage Research. Elsevier*, 213, 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105111> [in English].

Martre, P., Dueri, S., & Guarin, J.R. (2024). Global needs for nitrogen fertilizer to improve wheat yield under climate change. *Nat Plants*, 10 (7), 1081–1090. <https://doi.org/10.1038/s41477-024-01739-3> [in English].

Subbarao, G.V., Kishii, M., Bozal-Leorri, A., Orits-Monesterio, I., Gao, X., Ibba, M.I., Karwat, H., Gonzalez-Moro, M.B., Gonzalez-Murua, C., Yoshihashi, T., Tobita, S., Kommerell, V., Braun, H.J., & Iwanaga M. (2021). World's first successful development of wheat that shows high productivity with less nitrogen fertilizer – Use of ammonium to prevent nitrogen pollution and increase food production at the same time. *Proceedings of the National Academy of Sciences of United States of America (PNAS)*, 5 (113), 84–92. <https://doi.org/10.1073/pnas.2106595118> [in English].

Yokamo, S., Irfan, M., Huan, W., Wang, B., Wang, Y., Ishfaq, M., Lu, D., Chen, X., Cai, Q., & Wang, H. (2023). Global evaluation of key factors influencing nitrogen fertilization efficiency in wheat: a recent meta-analysis. *Systematic review article. Front. Plant Sci., Sec. Plant Nutrition*, 14, 84–94. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1272098> [in English].

Отримано: 10.04.2025
Прийнято: 15.05.2025



УДК 551.534:631.52
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.28>

АГРОЕКОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ ФОРМУВАННЯ ПОТЕНЦІЙНОГО ВРОЖАЮ СОЧЕВИЦІ

О. Є. Ярмольська¹, О. А. Барсукова², Е. В. Натальченко³

У статті надано аналіз показників продуктивності сочевиці в різних кліматичних умовах, а також розрахунки різних категорій урожаїв сочевиці з використанням агрокліматичної моделі продуктивності.

До початку Другої світової війни Україна була лідером у світі з вирощування і споживання сочевиці. Зараз же знання про цю надзвичайно корисну стародавню культуру частково втрачено, але агрономи та селекціонери України останніми роками повертаються до вирощування сочевиці. За унікальні властивості сочевицю називають бобовою царицею.

Уведення зернобобових у сівозміну дозволяє зменшити внесення мінеральних добрив і пестицидів.

Унікальна сочевиця й тим, що не спроможна накопичувати нітрати та радіонукліди, тому, навіть вирощена в забруднених районах, завжди є екологічно чистим продуктом. Зараз підвищена увага українських аграріїв до сочевиці, що зумовлено можливістю її повсюдного вирощування і високими показниками рентабельності – до 80–100%. Тому, роботи з оцінювання можливостей вирощування сочевиці в різних регіонах України є актуальними.

За результатами розрахунків, за допомогою динамічної моделі, надана характеристика ефективності вирощування сочевиці в Тернопільській області. Також було проведено аналіз сприятливості кліматичних умов даного регіону згідно з потребами культури в теплових, водних і радіа-

¹ кандидат географічних наук,
старший науковий співробітник відділу стійкості до абіотичних факторів
(Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннєзнавства та сортовивчення,
м. Одеса)

e-mail: somename1327@gmail.com
ORCID: 0000-0002-0279-8330

² кандидат географічних наук,
доцент кафедри агрометеорології та агроекології
(Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, м. Одеса);
старший співробітник

(Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства Національної академії аграрних наук
України, с-ще Хлібодарське)
e-mail: lena5933@ukr.net
ORCID: 0000-0002-9054-142X

³ молодший науковий співробітник відділу стійкості до абіотичних факторів
(Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннєзнавства та сортовивчення,
м. Одеса)

e-mail: maks_11.12.2013@ukr.net
ORCID: 0000-0003-1355-147X

ційних ресурсах, розраховані коефіцієнти ефективності та рівень господарського використання метеорологічних і ґрунтових умов. Окрім того, були розраховані агроекологічні категорії врожайів сочевиці за різних рівнів використання радіаційних ресурсів.

У розрахунках використанні середньобагаторічні метеорологічні й агрометеорологічні дані в Тернопільській області, а також дані фенологічних спостережень посівів сочевиці, ряди середньообласної врожайності сочевиці з 1995 до 2023 року. За результатами дослідження надані рекомендації щодо використання потенціалу агрокліматичних ресурсів для отримання максимальних урожаїв сочевиці.

Ключові слова: агрокліматичні умови, фотосинтетична продуктивність, вологозабезпеченість, термічні ресурси, модель.

AGROECOLOGICAL INDICATORS OF THE FORMATION OF POTENTIAL YIELD OF LENTILS

O. E. Yarmolska, O. A. Barsukova, E. V. Natalchenko

The article provides an analysis of lentil productivity indicators under various climatic conditions, as well as calculations of different categories of lentil crops using an agroclimatic model of productivity.

Before the beginning of the Second World War, Ukraine held a leading position in the world in the cultivation and consumption of lentils. Now the knowledge about this extremely useful ancient culture is partially lost, but agronomists and breeders of Ukraine are returning to the cultivation of lentils in recent years. Due to its unique properties, lentils are called the bean queen.

The introduction of legumes into crop rotation allows to reduce the application of mineral fertilizers and pesticides. Lentils are unique in that they are not able to accumulate nitrates and radionuclides, therefore, even grown in polluted areas, they are always an environmentally friendly product. Currently,

Ukrainian farmers are paying increased attention to lentils, and this is due to the possibility of its widespread cultivation and high profitability indicators of up to 80–100%. Therefore, work on assessing the possibilities of growing lentils in different regions of Ukraine is relevant.

According to the results of calculations, using a dynamic model, a characteristic of the efficiency of lentil cultivation in the Ternopil region was provided. An analysis of the favorable climatic conditions of this region in comparison with the needs of the crop in thermal, water and radiation resources were also conducted, efficiency coefficients and the level of economic use of meteorological and soil conditions were calculated. In addition, agroecological categories of lentil yields were also calculated at different levels of use of radiation resources.

The calculations used average medium perennial meteorological and agrometeorological data in the Ternopil region, as well as data from phenological observations of lentil crops, series of average regional lentil yields from 1995 to 2023. Based on the results of the study, recommendations were provided on using the potential of agroclimatic resources to obtain maximum lentil yields.

Key words: agroclimatic conditions, photosynthetic productivity, moisture availability, thermal resources, model.

Вступ

Ґрунтово-кліматичні умови України, зокрема Полтавської, Чернігівської, Київської, Волинської, Тернопільської, Кіровоградської областей, були одними з найбільш сприятливих для отримання високих урожаїв сочевиці. Зараз ми спостерігаємо зміну в географії вирощування сочевиці через клімат. Якщо раніше сочевицю не вирощували на заході України, то у 2018 р. на Львівщині одна з компаній отримала найбільшу врожайність по Україні, також посіви сочевиці переміщуються на південь (Петкович і Мельниченко, 2016).

Сочевиця – цінний дієтичний продукт, енергетична цінність сочевиці становить

310 ккал/100г. Насіння вирізняється високими смаковими якостями. У їжу його вживають свіжим і консервованим. Уміст білка – 24–30%, за розвареністю воно перевершує горох, нут і квасолю, жирів – 1,4%, вуглеводів – 52%, мінеральних речовин – 3,2%. До складу сочевиці входить до 3 вітамінів групи В, вітамін РР, каротин, залізо, кальцій, калій, фосфор, мідь, марганець, молібден, йод, бор, цинк, жирні поліненасичені кислоти (Клиша і Кулініч, 2009).

Сочевиця завдяки різноманітному складу має низку корисних властивостей і може використовуватися в лікувальному харчуванні. Сочевиця підвищує працездатність, а також використовується для лікування

каменів у нирках, опіків і ран. У сочевиці міститься амінокислота – триптофан, що перетворюється в організмі людини на серотонін – гормон радості, що пригнічує депресію (Erskine et al., 2009).

Завдяки симбіозу кореневої системи рослин з азотфіксувальними бактеріями сочевиця збагачує ґрунт азотом. Як корми застосовуються соломка та полови сочевиці. Уміст білка в соломі становить до 14–15%, за поживністю вона відповідає хорошему луговому сіну, у полові – до 18–20%, що перевершує зерно вівса й висівки жита. 1 кг полови сочевиці містить 0,56 кормових одиниць. На корм також використовується розмелене насіння, що є хорошим концентрованим кормом для всіх сільськогосподарських тварин. У сочевиці є дивовижна властивість не вбирати нітрати й отруйні елементи, якими щедро постачають поля виробники. Тому ця культура вважається екологічно чистим продуктом і рекомендована в дитячому харчуванні. Середня врожайність насіння сочевиці в Україні становить приблизно 1,4 т/га (Каленська і Шихман, 2011).

Матеріал і методи

Предметом дослідження є порівняльне оцінювання агрокліматичних умов Тернопільської області та розвиток і формування врожайності сочевиці.

Методами дослідження є оцінювання продуктивності сільськогосподарських культур за допомогою моделювання росту та розвитку рослин протягом вегетаційного періоду. У наших розрахунках ми використали середньобагаторічні метеорологічні й агрометеорологічні дані в Тернопільській області, інформацію фенологічних спостережень сочевиці, а також ряди середньобласної врожайності сочевиці з 1995 р. до 2023 р. (Прокопенко і Адаменко, 2010).

Для агроекологічної оцінки умов формування врожайності різного рівня ми у своїх дослідженнях використали запропоновану А.М. Польовим модель агрокліматичної оцінки продуктивності посівів. За допомогою моделювання були виконані розрахунки потенційного врожаю залежно від надходження сумарної радіації та інтенсивності фотосинтетично активної радіації (далі – ФАР) (Польовий, 2012; Польовий, 2013).

У дослідженнях (Польовий, 2013; Ghanem et al, 2015, Qi et al, 2024) було запропоновано виділити декілька категорій урожайності, які будуть відображати кліматичні умови району вирощування. Для розрахунку потенційної продуктивності культур

було використано метод еталонних урожаїв, що являє собою принцип максимальної продуктивності посівів, де необхідно порівняти різні категорії врожаїв: дійсно можливий урожай (далі – ДМВ), потенційний урожай (далі – ПВ) і врожай, отриманий безпосередньо у виробництві (далі – УВ).

Потенційний урожай (ПВ) можна отримати в умовах належного зволоження та забезпечення теплом, тобто в ідеальних умовах. Потенційний урожай залежить від фотосинтетично активної радіації, агротехніки вирощування та особливостей сорту. ПВ можна визначити за формулою (Польовий, 2013):

$$ПВ = 10^4 I K_m \times \sum Q / g \quad (1),$$

де I – ККД ФАР сочевиці в оптимальних умовах, %;

K_m – коефіцієнт господарської ефективності врожаю, або доля основної продукції в загальній біомасі;

$\sum Q$ – сумарне надходження ФАР за період вегетації, кДж/см²;

g – калорійність урожаю, кДж/кг.

Результати та обговорення

Було досліджено, що сумарна радіація за період вегетації сочевиці має тенденцію росту від 360,64 кал/см²*добу до 433,47 кал/см²*добу. Максимальна величина спостерігається в п'яту декаду вегетації сочевиці, потім повільно зменшується до 396,25 кал/см²*добу. ФАР впродовж періоду вегетації змінюється від 0,204 до 0,244 кал/см²*хв.

Середня температура повітря за декаду була в межах від 10,6 до 18,5 °С. На рис. 1 представлена онтогенетична крива фотосинтезу.

Сума ефективних температур вище за 10 °С за період вегетації дорівнює 895 °С. Надходження сумарної радіації в період від появи сходів до дозрівання сочевиці в Тернопільській області представлена на рис. 2.

У декаду появи сходів сочевиці, яка за середніми багаторічними даними припадає на кінець третьої декади квітня, надходження сумарної радіації дорівнювало 360 кал/см²*добу. У першу та другу декади травня надходження сумарної радіації зростало до 416 кал/см²*добу. У наступні декади вегетації надходження сумарної радіації зросло до максимальних значень. Так, у п'ятій декаді вегетації набуло значення 433 кал/см²*добу. У шосту декаду вегетації, через збільшення хмарності,

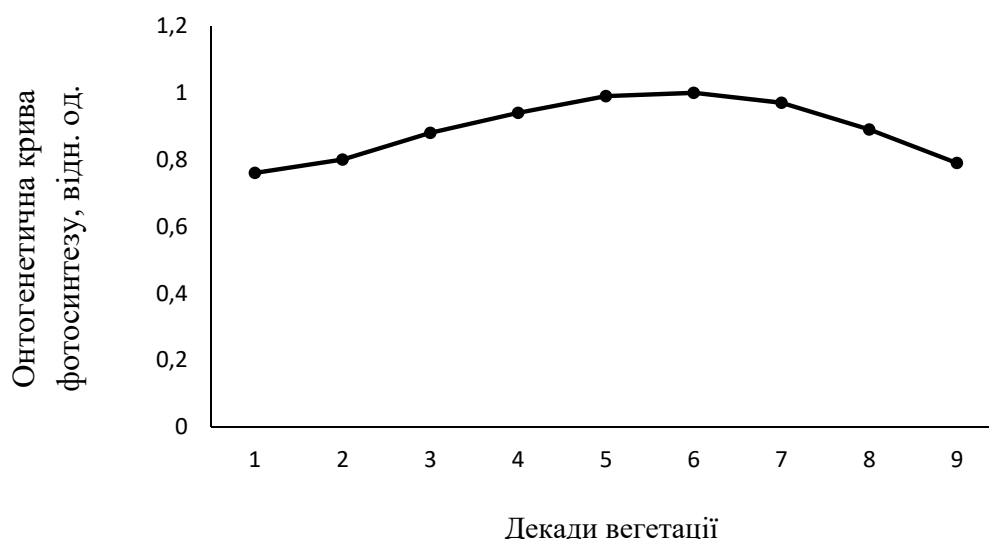


Рис. 1. Онтогенетична крива фотосинтезу за вегетаційний період сочевиці в Тернопільській області

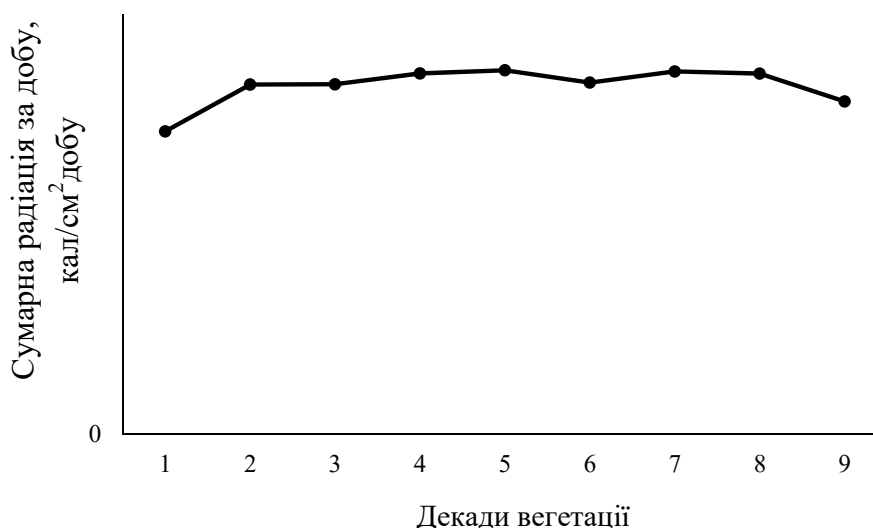


Рис. 2. Динаміка надходження сумарної радіації по декадах вегетації сочевиці в Тернопільській області

надходження сумарної радіації знову зменшилось до 418 кал/см²*добу. Далі на фазу дозрівання сочевиці надходження сумарної радіації становило в середньому 396 кал/см²*добу.

Інтенсивність ФАР за вегетаційний період сочевиці в Тернопільській області представлена на рис. 3. Як видно з рисунка (див. рис. 3), інтенсивність ФАР в першу декаду дорівнює 0,204 кал/см²*хв.

Починаючи із третьої декади й до восьмої декади вегетаційного періоду сочевиці інтенсивність ФАР має максимальне значення за вегетаційний період і дорівнює 0,244 кал/см²*хв, до кінця вегетації відбу-

вається поступове зниження інтенсивності ФАР до 0,31 кал/см²*хв.

Нами також була розрахована динаміка потенційної врожайності сухої маси сочевиці по декадах вегетації в Тернопільській області за різних значень ККД (рис. 4). Значення ПУ: база, збільшення на 10, 20 і 30%.

Динаміка врожаїв сухої маси сочевиці повторює хід кривих ККД впродовж вегетаційного періоду, але має різні кількісні значення залежно від росту відсотків ККД. Найвищі значення сухої маси ПУ спостерігаються за 30% і поступово зменшуються зі зменшенням ККД.

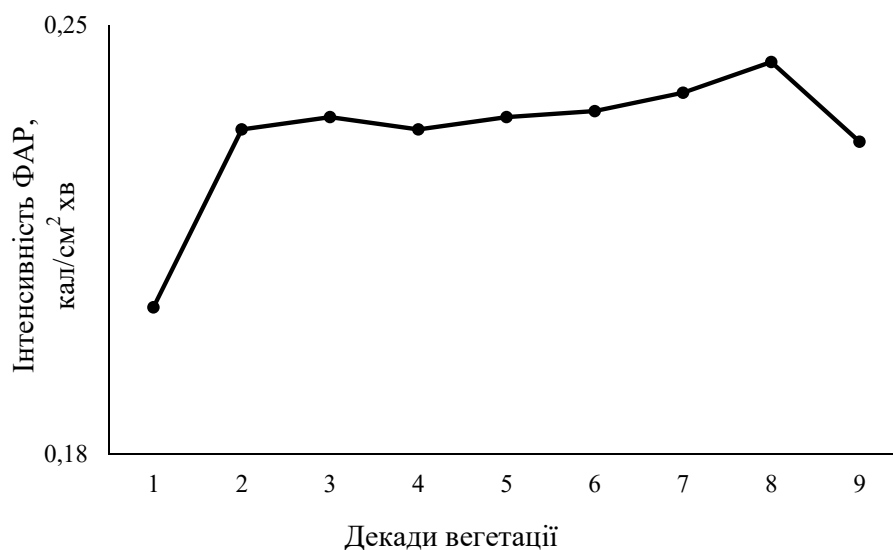


Рис. 3. Інтенсивність ФАР впродовж вегетаційного періоду сочевиці в Тернопільській області

Прирости сухої біомаси (див. рис. 4) починаються з позначки $18 \text{ г/м}^2 \cdot \text{дек.}$. Наступної декади значне збільшення, де рівень ДПУ становить $179 \text{ г/м}^2 \cdot \text{дек.}$. Максимальний приріст спостерігається в четвертій декаді і становить $148 \text{ г/м}^2 \cdot \text{дек.}$, далі йде поступове зниження приростів ПУ зі 142 до $127 \text{ г/м}^2 \cdot \text{дек.}$. Наприкінці вегетації ДПУ знижується до рівня приростів $92 \text{ г/м}^2 \cdot \text{дек.}$

Температура, рівень якої сприяє максимальній продуктивності культури, називається оптимальною (далі – ТОР). У цієї температури є нижня межа (далі – ТОР1) і верхня (далі – ТОР2).

Оптимальна температура для процесу фотосинтезу змінюється впродовж усього періоду вегетації сочевиці. Динаміка температури повітря впродовж вегетаційного періоду за базових умов представлена на рис. 5.

Діапазон оптимальних температур для сочевиці, який представлено на рисунку, змінюється в межах від $5,2$ до 21°C . Нижня межа температурного оптимуму починається з $5,2^\circ\text{C}$, поступово зростає, досягає максимуму – $17,6^\circ\text{C}$ у дев'яту декаду. Верхня межа температурного оптимуму починається з $11,7^\circ\text{C}$, поступово зростає

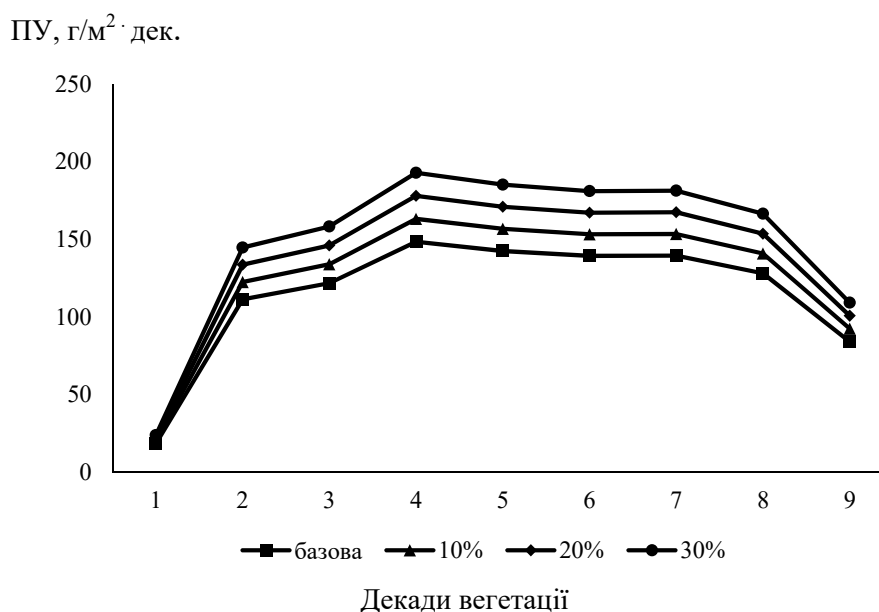


Рис. 4. Динаміка приростів ПУ сухої маси сочевиці в Тернопільській області

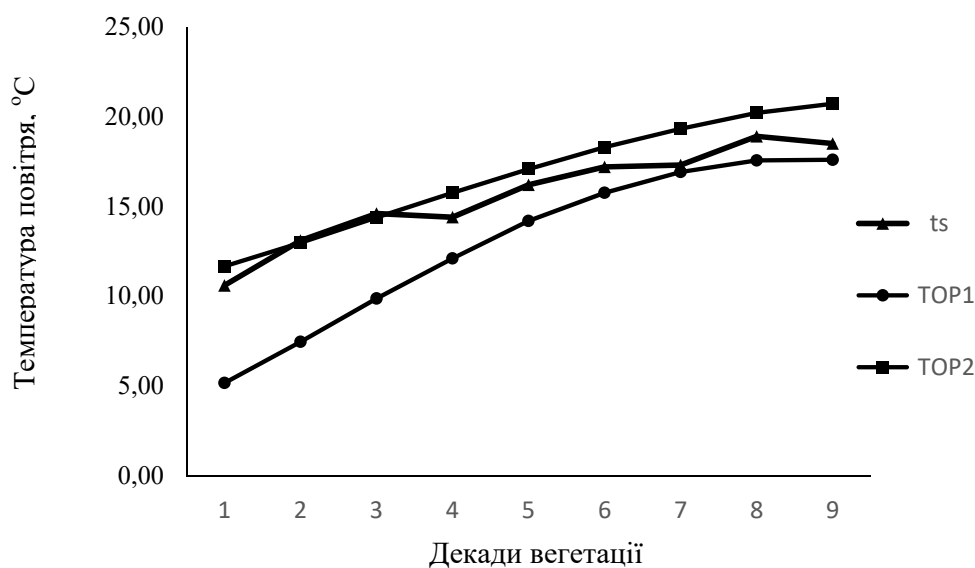


Рис. 5. Динаміка температурного режиму вегетаційного періоду сочевиці в Тернопільській області

і до кінця вегетаційного періоду сочевиці, тобто в дев'яту декаду, становить 20,7 °С.

Температурна крива середніх за декаду температур повітря (ts) починається з 10,6 °С. Поступово підвищується від другої до третьої декад, децю виходить за верхню оптимальну межу і становить 14,6 °С. Наступної декади середня температура повітря спостерігається в діапазоні температурного оптимуму і становить 14,4 °С. Але потім, протягом 5–9 декад,

середня за декаду температура повітря перебувала в межах температурного оптимуму.

У результаті дослідження динаміки приростів можна сказати, що вона повторює хід кривих приростів ПУ (рис. 6). Для базового варіанту приростів (ДМВ) сочевиці можна сказати, що в першу декаду вегетації приріст не перевищує 16 г/м²*дек., потім протягом вегетації зростає, максимальне значення в четверту декаду вегетації досягає 130 г/м². З п'ятої декади вегетації почи-

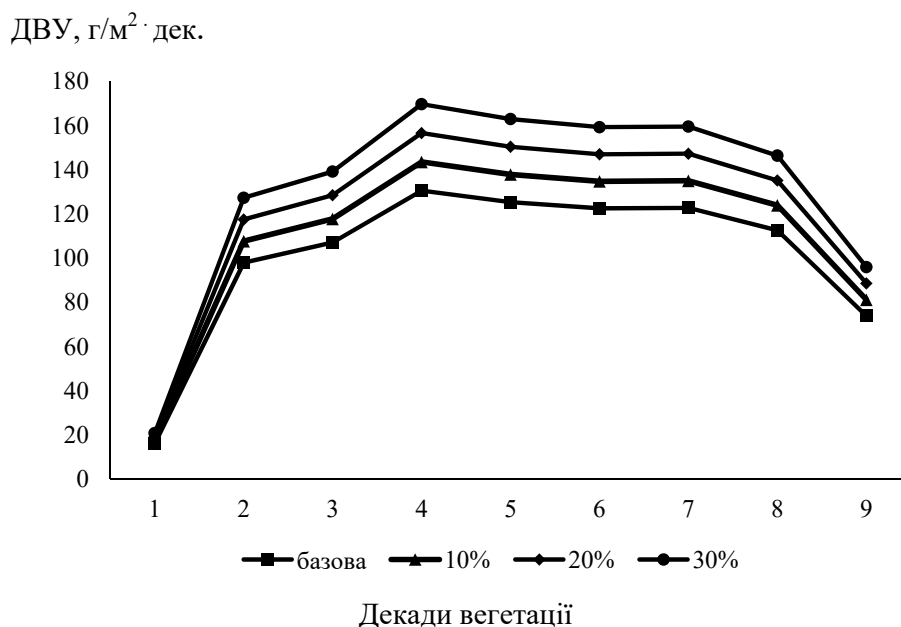


Рис. 6. Динаміка приростів ДВУ сухої маси сочевиці в Тернопільській області

нається поступове зниження приростів потенційного врожаю (ПУ) до $112 \text{ г/м}^2 \cdot \text{дек.}$ В останню декаду вегетації сочевиці ДДВУ характеризується падінням рівня приростів до $73 \text{ г/м}^2 \cdot \text{дек.}$

Оцінено умови вологозабезпеченості посівів сочевиці. Як показано на рис. 7, на початку вегетації сумарне випаровування за декаду становить 4 мм, наступної декади його рівень різко підвищується до 30 мм і є максимальним значенням для всього вегетаційного періоду, надалі спостерігається зниження до 24 мм.

Динаміка випаровуваності представлена на рис. 7. На початку вегетації випаровуваність за декаду становить 5 мм, далі рівень зростає до 34 мм, наступної декади, у період виходу у трубку – колосіння, рівень знижується до 29 мм. Дві останні декади цього періоду випаровуваність максимальна за весь вегетаційний період – 34 мм. За міжфазний період молочної – воскової стиглості рівень сумарного випаровування становить 14 мм.

Динаміка E_{ϕ}/E_0 представлена на рис. 7. Величина відношення сумарного випаровування за декаду до випаровування в четверту декаду становить 0,79 відн. од. – це максимальна величина за весь вегетаційний період сочевиці. Далі починається ріст відношення E_{ϕ}/E_0 до кінця вегетації, на кінець вегетації сочевиці становить 0,85 відн. од.

Аналіз базового варіанту приростів УВ сочевиці (рис. 8) показав, що впродовж пер-

шої декади вегетації приріст УВ становив 10 г/м^2 , після чого він поступово зростає, досягаючи максимуму – 84 г/м^2 – у четверту декаду.

З п'ятої декади вегетації спостерігається поступове зниження приростів ПУ із 80 до $72 \text{ г/м}^2 \cdot \text{дек.}$ Дев'ята декада вегетації сочевиці характеризується падінням рівня приростів до $47 \text{ г/м}^2 \cdot \text{дек.}$

За допомогою динамічної моделі були розраховані характеристики продуктивності: ступінь сприятливості агрокліматичних ресурсів, оцінка ефективності використання агрокліматичних ресурсів, оцінка господарського використання метеорологічних і ґрунтових умов. Окрім того, були розраховані агроекологічні рівні врожаїв сочевиці. Результати цих розрахунків для Тернопільської області представлені в табл. 1.

Ступінь сприятливості метеорологічних умов для вирощування культури характеризує співвідношення максимально можливого врожаю (ММВ) і потенційного врожаю (ПВ). Сприятливість ґрунтових умов відображає дійсно можливий врожай (ДДВ) та ММВ.

Ступінь сприятливості кліматичних умов (СВУ) сочевиці в Тернопільській області становить 0,865 відн. од. Співвідношення УВ та ММВ свідчить про ефективність використання агрокліматичних ресурсів. У нашому випадку оцінка рівня використання агрокліматичних ресурсів за середньобагаторічними даними становить 0,726 відн. од.

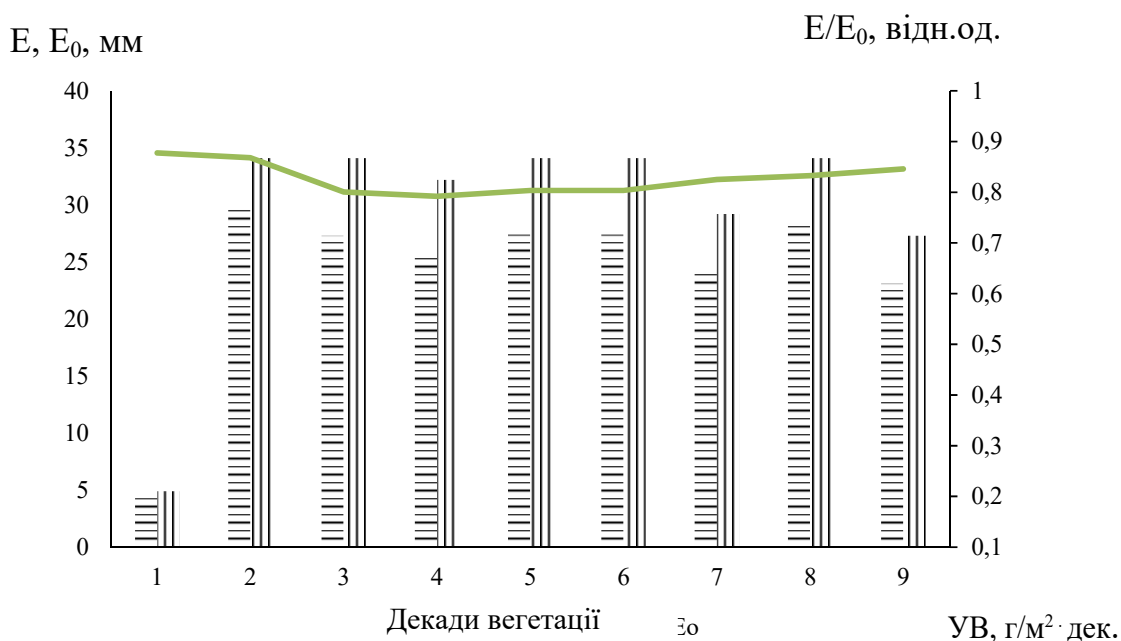


Рис. 7. Динаміка водного режиму вегетаційного періоду сочевиці в Тернопільській області

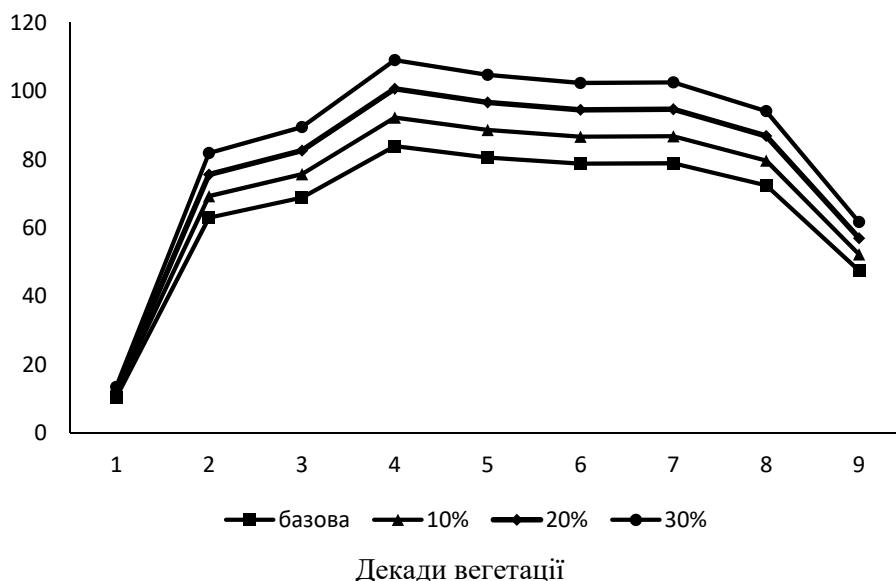


Рис. 8. Динаміка приростів УВ сухої маси сочевиці в Тернопільській області

Таблиця 1

Комплексні оцінки продуктивності сочевиці

№	Оцінки	Значення
1	Оцінка ступеня сприятливості кліматичних умов, відн. од.	0,865
2	Оцінка рівня використання агрокліматичних ресурсів, відн. од.	0,726
3	Оцінка рівня реалізації агроекологічного потенціалу, відн. од.	0,566
4	Оцінка рівня господарського використання метеорологічних і ґрунтових умов, відн. од.	0,623
5	ПУ всієї сухої маси, г/м ²	1 032,6
6	ММУ всієї сухої маси, г/м ²	987,0
7	ДМУ всієї сухої маси, г/м ²	808,8
8	УВ всієї сухої маси, г/м ²	587,1
9	ПВ зерна, ц/га	23
10	ММВ зерна, ц/га	20
11	ДМВ зерна, ц/га	17
12	УВ зерна, ц/га	13

Величина УВ щодо рівня ПВ характеризує ступінь реалізації агроекологічного потенціалу і становить 0,566 відн. од.

У реальних ґрунтових умовах співвідношення УВ та ДМВ можна розглядати як показник досконалої агротехнології, він у Тернопільській області становить 0,623 відн. од.

У табл. 2 наводяться розрахунки УВ, розраховані за різних значень ККД, збільшених на 10, 20, 30%.

Різний урожай зерна сочевиці формується залежно від величини врожаю сухої маси рослин. Урожай при коефіцієнта корисної дії (база) становитиме 13,3 ц/га, 14,6 ц/га за збільшення ККД на 10%, 15,9 ц/га за збіль-

Таблиця 2

Потенційно можливий урожай (УВ) сочевиці в Тернопільській області

% збільшення ККД	Урожай, ц/га
0% (база)	13,3
10%	14,6
20%	15,9
30%	17,3

шення ККД на 20%, 17,3 ц/га за збільшення ККД на 30%.

Висновки

У результаті проведеного аналізу значень комплексних оцінок сприятливості кліматичних ресурсів, ефективності вико-

ристання агрокліматичних ресурсів і оцінок господарського використання метеорологічних і ґрунтових умов у Тернопільській області доходимо висновку, що в цьому регіоні є великі резерви для підвищення продуктивності сочевиці з використанням заходів оптимізації технології вирощування, використання високопродуктивних сортів. На території Тернопільської області за високої та середньої ефективності вико-

ристання агрокліматичних ресурсів можна отримувати найбільш високі рівні врожайів у виробництві.

Потенційно можливий урожай у виробництві сочевиці за коефіцієнта корисної дії 30% буде отримано до 17,3 ц/га.

Маємо надію, що поданий матеріал зацікавить широке коло фахівців агропромислового комплексу з вирощування сочевиці в Україні.

Список використаної літератури

Каленська С.М., Шихман Н.В. Продуктивність сочевиці залежно від мінерального живлення та передпосівної обробки насіння в умовах Правобережного Лісостепу України. *Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2011. № 4 (26). С. 1–8.

Клиша А.І., Кулініч О.О. Вихідний селекційний матеріал сочевиці і новий сорт Лінза. *Зрошуване землеробство*. 2009. № 51. С. 171–176.

Петкович З.З., Мельниченко Г.В. Нут, сочевиці – перспективні зернобобові культури для вирощування на Півдні України. *Зрошуване землеробство : збірник наукових праць*. 2016. № 65. С. 102–104.

Польовий А.М. Сільськогосподарська метеорологія : підручник. Одеса : ТЕС, 2012. 612 с.

Польовий А.М. Моделювання гідрометеорологічного режиму та продуктивності агроєкосистем : підручник. Одеса : ОДЕКУ, 2013. 430 с.

Прокопенко А.А., Адаменко Т.І. Агрокліматичний довідник по Тернопільській області (1986–2005 рр.). Тернопіль, 2010. 183 с.

Ersikine W., Muehlbauer F.J., Sarker A., Sharma B. The lentil: botany, production and uses. *CAB International*. 2009. 457 p.

Ghanem M.E., Marrou H., Soltani A., Kumar S., Sinclair T.R. Lentil Variation in Phenology and Yield Evaluated with a Model. *Agronomy Journal*. 2015. Vol. 107. № 6. P. 1–32. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0061>.

Qi Jing, Boote K.J., Kui Liu, Hoogenboom G., White J.W., Smith W., Jegu G., Grant B., Crépeau M., Shang J. et al. Simulating the development and growth of lentil using the CSM-CROPGRO model. *Agronomy Journal*. 2024. P. 2391–2410. <https://doi.org/10.1002/agj2.21654>.

References

Kalenska, S.M., & Shykhman, N.V. (2011). Produktivnist sochevytsi zalezchno vid mineralnoho zhyvlennia ta peredposivnoi obrobky nasinnia v umovakh Pravoberezhnoho Lisostepu Ukrainy [The productivity of lentils depends on the type of mineral nutrition and the pre-processing of seeds in the conditions of the Right Bank of the Forest-Steppe of Ukraine]. *Naukova dopovid NUBIP [Scientific report NUBIP]*, 4 (26), 1–8 [in Ukrainian].

Klysha, A.I., & Kulinich, O.O. (2009). Vykhidnyi selektsiinyi material sochevytsi i novyi sort Linza [Source selection material of lentils and a new variety Linza]. *Zroshuvane zemlerobstvo [Irrigated agriculture]*, 51, 171–176 [in Ukrainian].

Petkovych, Z.Z., & Melnychenko, H.V. (2016). Nut, sochevytsi – perspektyvni zernobobovi kultury dlia vyroshchuvannia na Pivdni Ukrainy [Chickpeas, lentils – promising legume crops for cultivation in the South of Ukraine]. *Zroshuvane zemlerobstvo: zbirnyk naukovykh prats [Irrigated agriculture: collection of scientific papers]*, 65, 102–104 [in Ukrainian].

Polevoy, A.M. (2012). Silskohospodarska meteorolohiia: pidruchnyk [Agricultural meteorology: textbook]. Odessa [in Ukrainian].

Polevoy, A.M. (2013). Modeliuvannia hidrometeorolohichnoho rezhymu ta produktivnosti ahroekosystem: pidruchnyk [Modeling of the hydrometeorological regime and productivity of agroecosystems: textbook]. Odessa [in Ukrainian].

Prokopenko, A.L., & Adamenko T.I. (2010). Ahroklimatychnyi dovidnyk po Ternopil'skyi oblasti (1986–2005 rr.) [Agroclimatic directory for Ternopil region (1986–2005)]. Ternopil [in Ukrainian].

Ersikine, W., & Muehlbauer, F.J. et al. (2009). The lentil: botany, production and uses. *CAB International*, 457 [in English].

Ghanem, M.E., Marrou, H., Soltani, A., Kumar, S., & Sinclair, T.R. (2015). Lentil Variation in Phenology and Yield Evaluated with a Model. *Agronomy Journal*, 107 (6), 1–32. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0061> [in English].

Qi, J., Boote, K.J., Kui, L., Hoogenboom, G., White, J.W., Smith, W., Jegu, G., Grant, B., Crêpeau, M., & Shang, J. et al. (2024). Simulating the development and growth of lentil using the CSM-CROPGRO model. *Agronomy Journal*, 2391–2410. <https://doi.org/10.1002/agj2.21654> [in English].

Отримано: 25.04.2025

Прийнято: 15.05.2025



Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 12
Український журнал природничих наук
№ 12

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

ЕКОЛОГІЯ

УДК 504.550.43

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.29>

ШАРУВАТІ ПОДВІЙНІ ГІДРОКСИДИ ЯК СОРБЕНТИ ДЛЯ ДООЧИЩЕННЯ ПРИРОДНИХ ВОД ВІД НАФТОПРОДУКТІВ: СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

Е. О. Бутенко¹, О. Є. Капустін²

У статті систематизовано сучасні досягнення у застосуванні шаруватих подвійних гідроксидів (ШПГ) для видалення нафтопродуктів з природних вод. Проаналізовано вплив хімічного складу

$([M^{2+}]_x M^{3+}_x (OH)_2]^{x+} (A^{n-})_x / n \cdot m H_2O$, де $M^{2+} = Mg^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+}$; $M^{3+} = Al^{3+}, Fe^{3+}$;

$A^{n-} = CO_3^{2-}, NO_3^-, SO_4^{2-}$) на сорбційну ємність щодо різних класів нафтопродуктів (аліфатичні, ароматичні, поліароматичні сполуки). Наведено механізми сорбції, що охоплюють: міжшаровий аніонний обмін, поверхневу адсорбцію, хемосорбцію через гідроксильні групи. Особливу увагу приділено модифікованим ШПГ, які демонструють підвищену ефективність (до 98% видалення) та зручність регенерації. Обговорюються перспективи створення промислових фільтрувальних систем на основі ШПГ для ліквідації аварійних розливів нафти та доочищення стічних вод.

Забруднення водних екосистем нафтопродуктами є критичною екологічною проблемою через їхню токсичність, стійкість до біодеградації та здатність до біоаккумуляції.

Сучасні екологічні виклики, пов'язані з нафтовим забрудненням водних екосистем, зумовлюють необхідність розробки високоефективних методів доочищення природних вод через зростаючу загрозу нафтового забруднення.

Щорічні світові розливи нафти перевищують 8 млн тонн. Традиційні методи (механічне збирання, коагуляція) ефективні лише для 60–70% забруднень. Виняткова токсичність для поліароматичних вуглеводнів за концентрацій $> 0,01$ мг/л.

Традиційні сорбенти (активоване вугілля, цеоліти) мають обмежену ефективність для емульгованих форм нафтопродуктів. Шаруваті подвійні гідроксиди є альтернативними сорбційними матеріалами нового покоління для доочищення природних вод від нафтопродуктів завдяки своїй унікальній комбінації властивостей, а саме: регульований міжшаровий простір (0,7–2,2 нм), висока аніонообмінна ємність (до 4 мекев/г), можливість функціоналізації поверхні.

Мета роботи наукового дослідження полягає у дослідженнях щодо використання шаруватих

¹ кандидат технічних наук, доцент,
завідувачка кафедри хімічної технології та інженерії
(Державний вищий навчальний заклад
«Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь)
e-mail: butenko_e_o@pstu.edu
ORCID: 0000-0002-6296-2075

² кандидат хімічних наук, професор
(Havighurst Center, Miami University,
349 E. High St. Oxford, 45056, OH)
e-mail: kapustinlesha@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1253-0351

подвійних гідроксидів для сорбційного видалення нафтопродуктів із природних вод, аналізі ключових властивостей шаруватих подвійних гідроксидів перемінного складу, що обумовлюють їх ефективність, як сорбентів (їх регульований хімічний склад, висока аніонообмінна ємність, здатність до модифікації поверхні); дослідженні механізмів сорбції нафтопродуктів, включно з міжшаровим аніонним обміном, поверхневою адсорбцією, хемосорбцією через функціональні групи; оцінці ефективності різних типів шаруватих подвійних гідроксидів (Mg-Al, Zn-Al, Fe-вмісні) для видалення легких (бензин) і важких (мазут) фракцій нафтопродуктів, поліароматичних вуглеводнів, емульгованих форм; визначенні оптимальних умов сорбційного доочищення (рН середовища, час контакту, маса сорбенту, температура); аналізі перспективних напрямів модифікації шаруватих подвійних гідроксидів для підвищення їх ефективності; розробці рекомендацій щодо практичного застосування шаруватих подвійних гідроксидів у системах доочищення промислових стічних вод, технологіях ліквідації аварійних розливів нафти, стаціонарних очисних спорудах.

Практичне значення. Результати роботи можуть бути використані для вдосконалення існуючих методів водоочищення, розробки нових екологічно безпечних сорбентів, запобігання забрудненню водних екосистем нафтопродуктами.

Економічні й екологічні вигоди. Зниження витрат на доочищення на 40–60 % порівняно з мембранними методами. Можливість використання відпрацьованих сорбентів у дорожньому будівництві.

Ключові слова: шаруваті подвійні гідроксиди, сорбція нафтопродуктів, доочищення води, аніонний обмін, нанокомпозитні сорбенти.

LAYERED DOUBLE HYDROXIDES AS SORBENTS FOR THE PURIFICATION OF NATURAL WATERS FROM PETROLEUM PRODUCTS: CURRENT STATUS AND APPLICATION PROSPECTS

E. O. Butenko, A. E. Kapustin

The article systematizes modern achievements in the application of layered double hydroxides (LDHs) for the removal of petroleum products from natural waters. The influence of the chemical composition ($[M^{2+}_{1-x}M^{3+}_x(OH)_2]^{x+}(A^n)_{x/n} \cdot m H_2O$, де $M^{2+} = Mg^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+}$; $M^{3+} = Al^{3+}, Fe^{3+}$; $A^n = CO_3^{2-}, NO_3^-, SO_4^{2-}$) on the sorption capacity for different classes of petroleum products (aliphatic, aromatic, polyaromatic compounds) is analyzed. The sorption mechanisms are presented, including: interlayer anion exchange, surface adsorption, chemisorption through hydroxyl groups. Special attention is paid to modified DLHs (organoclay composites, magnetic nanocomposites), which demonstrate increased efficiency (up to 98% removal) and ease of regeneration. The prospects for creating industrial filtration systems based on SHPG for liquidation of oil spills and wastewater treatment are discussed. Pollution of aquatic ecosystems by petroleum products is a critical environmental problem due to their toxicity, resistance to biodegradation and ability to bioaccumulate.

Modern environmental challenges associated with oil pollution of aquatic ecosystems necessitate the development of highly effective methods for the secondary treatment of natural waters due to the growing threat of oil pollution. Annual global oil spills exceed 8 million tons. Traditional methods (mechanical collection, coagulation) are effective only for 60–70% of pollution. Exceptional toxicity of polyaromatic hydrocarbons at concentrations > 0.01 mg/l.

Traditional sorbents (activated carbon, zeolites) have limited effectiveness for emulsified forms of petroleum products. Layered double hydroxides are alternative sorption materials of a new generation for the purification of natural waters from petroleum products due to their unique combination of properties, namely: adjustable interlayer space (0.7–2.2 nm), high anion exchange capacity (up to 4 meq/g), the possibility of surface functionalization.

The purpose of the scientific research is to study the use of layered double hydroxides for the sorption removal of petroleum products from natural waters, to analyze the key properties of layered double hydroxides of variable composition, which determine their effectiveness as sorbents (their adjustable chemical composition, high anion exchange capacity, ability to modify the surface). Studies of the mechanisms of sorption of petroleum products, including interlayer anion exchange, surface adsorption, chemisorption through functional groups. Evaluation of the effectiveness of different types of layered double hydroxides (Mg-Al, Zn-Al, Fe-containing) for the removal of light (gasoline) and heavy (fuel oil) fractions of petroleum products, polyaromatic hydrocarbons, emulsified forms. Determination of optimal conditions for sorption secondary purification (pH of the medium, contact time, mass of the sorbent, temperature). Analysis of promising areas for modifying layered double hydroxides to increase their effectiveness. Development of recommendations for the practical application of layered double hydroxides in industrial wastewater secondary purification systems, technologies for liquidating emergency oil spills, stationary treatment facilities.

Practical significance. The results of the work can be used to improve existing water treatment methods, develop new environmentally safe sorbents, and prevent pollution of aquatic ecosystems by petroleum products.

Economic and environmental benefits. Reduction of post-treatment costs by 40–60% compared to membrane methods. Possibility of using spent sorbents in road construction.

Key words: layered double hydroxides, sorption of petroleum products, post-treatment of water, anion exchange, nanocomposite sorbents.

Вступ

Шаруваті подвійні гідроксиди (ШПГ), або Layered Double Hydroxides (LDH), – це клас аніонообмінних матеріалів із шаруватою структурою, які мають унікальні фізико-хімічні властивості (Chin-Ko et al., 2023). Вони знаходять застосування у сорбції, каталізі, медицині, енергетиці й екологічній інженерії. У структурі шаруватих подвійних гідроксидів можна назвати дві основні підсистеми: позитивно заряджені метал-гідроксидні шари та міжшарові області. Надлишковий позитивний заряд шарів виникає унаслідок часткового ізоморфного заміщення іонів двовалентного металу іонами тривалентного металу. Мережа водневих зв'язків, що існує між гідроксильними групами шарів, аніонами та молекулами води, надає шаруватій структурі додаткову стабільність.

Шари шаруватих подвійних гідроксидів здатні по-різному розташовуватися один щодо одного. Це явище призводить до виникнення двох основних політипів: політипу 3R з ромбоєдричною симетрією і політипу 2H з гексагональною симетрією (Panahi et al., 2019).

Політип 3R характерний для природного мінералу гідроталькиту, склад якого виражається формулою $[\text{Mg}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{16}](\text{CO}_3)\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (Narin et al., 2023).

Більшість синтетичних шаруватих подвійних гідроксидів – ізоструктурні гідроталькиту, тому їх часто називають «гідроталькітоподібними матеріалами». Природні мінерали та синтетичні сполуки із структурою гідроталькиту також у літературі часто називають «аніонними глинами».

Загальна формула всіх шаруватих подвійних гідроксидів має вигляд:

$$[\text{M}^{2+}_{1-x}\text{M}^{3+}_x(\text{OH})_2]^{x+}(\text{A}^{n-})_{x/n}\cdot m\text{H}_2\text{O}, \text{ де:}$$

M^{2+} – двовалентні катіони (Mg^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+});

M^{3+} – тривалентні катіони (Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} , Ga^{3+});

A^{n-} – гідроксидні аніони (CO_3^{2-} , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , органічні аніони);

x – мольна частка M^{3+} ($0,2 \leq x \leq 0,33$);

m – кількість молекул води.

Шаруваті подвійні гідроксиди мають шарувату структуру, подібну до бруситу ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) (рис. 1), але з частковим заміщен-

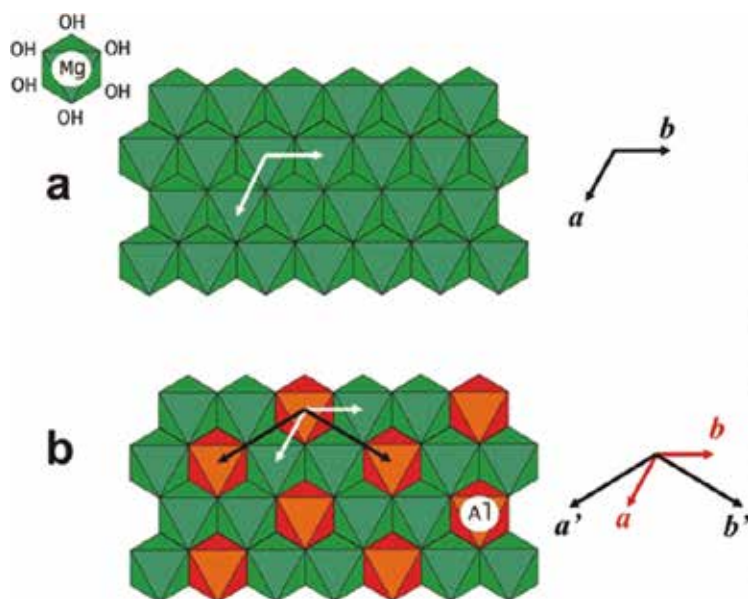


Рис. 1. Буситоподібна структура $\text{Mg}(\text{OH})_2$

ням M^{2+} на M^{3+} , що призводить до появи позитивного заряду на шарах. Інтеркаляція може бути здійснена методом співосадження та методом аніонного обміну.

У випадку методу співосадження змішаний розчин солей дво- і тривалентних металів додають у реактор, що містить розчин модифікатора. При цьому впровадження модифікатора в міжшаровий простір відбувається безпосередньо в процесі формування шаруватої структури зразка (Crepaldi, 2019). Метод аніонного обміну дає змогу запровадити модифікатор за допомогою реакції заміщення вихідного міжшарового аніону (Pavlovic, 2019). Метод здійснюється у два етапи. На першому етапі синтезується ШПГ – прекурсор, що містить у міжшаровому просторі нітрат- або карботан-аніон (нітратна або карбонатна форма ШПГ відповідно). Зазвичай як вихідний міжшаровий аніон вибирають нітрат-аніон, оскільки він легко вступає в реакцію аніонного обміну. На другому етапі здійснюється взаємодія ШПГ – прекурсора з розчином аніона-модифікатора. Величина рН розчину модифікатора, температура та кристалічність модифікованого зразка впливають на ступінь інтеркаляції, а також на спосіб упаковки молекул-модифікаторів у міжшаровому просторі шаруватих подвійних гідроксидів.

Отже, зі зростанням позитивного заряду шарів відбувається і збільшення концентрації аніонів, унаслідок чого утворюється структура з більш щільною упаковкою. Однак слід зазначити, що на відстань між

шарами впливає як кількість, так і розмір і орієнтація аніонів, а також особливості їх взаємодії з гідроксидними групами. Існує припущення, що негативно заряджені частинки прагнуть розташуватися в міжшаровому просторі або перпендикулярно, або два шари паралельно гідроксильним групам, тим самим мінімізуючи відстань між сусідніми шарами та збільшуючи площу зіткнення аніонів із бруситоподібним шаром.

Однак частки в міжшаровому просторі можуть розташовуватися неупорядковано, а водневі зв'язки – постійно та швидко утворюватися й розриватися, тому природа міжшарової взаємодії здається досить складною.

Компенсація заряду відбувається через аніони в міжшаровому просторі (рис. 2) (Erin et al., 2023).

Основні характеристики структури шаруватих подвійних гідроксидів полягають у тому, що катіонні шари – це октаедри $[M^{2+}/M^{3+}(OH)_6]$, зв'язані спільними ребрами (Fei et al., 2023). Міжшаровий простір містить аніони (CO_3^{2-} , NO_3^-) та молекули води. Базальна відстань (d): 0,7–2,5 нм (залежить від розміру аніонів).

Шаруваті подвійні гідроксиди є перспективними сорбентами порівняно з іншими матеріалами (активованим вугіллям, цеолітами, силікагелями) завдяки унікальній комбінації фізико-хімічних властивостей. Їх перевагами є можливість регулювання хімічного складу і структури, заміни катіонів (Mg^{2+} , Zn^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+}) та аніонів (CO_3^{2-} , NO_3^- , SO_4^{2-})

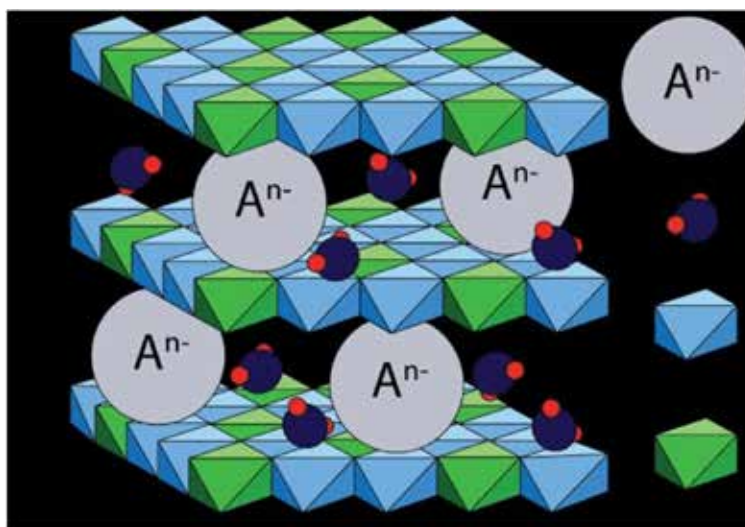


Рис. 2. Розташування аніонів у міжшаровій площині шаруватих подвійних гідроксидів

для цільового застосування, а також контроль міжшарової відстані (0,7–2,5 нм) для сорбції великих молекул (наприклад, нафтопродуктів).

Порівняно з іншими сорбентами в активованого вугілля обмежена можливість модифікації, у цеолітів – фіксований розмір пор (рис. 3).

Шаруваті подвійні гідроксиди мають унікальну властивість – «ефект пам'яті», що полягає у здатності продукту прожарювання ШПГ відновлювати початкову шарувату структуру за регідратації у водних розчинах різного складу. При цьому знову в міжшаровий простір, що утворюється, можливе введення різних аніонів, у тому числі органічних, що дає можливість отримувати матеріали із заданими властивостями для конкретних практичних цілей.

Усі відновлені зразки Mg–Al шаруватих подвійних гідроксидів зберігають структуру вихідного зразка.

Шаруваті подвійні гідроксиди проявляють високу сорбційну ємність порівняно з іншими сорбентами для різних забрудню-

вальних речовин, наприклад: для нафтопродуктів – до 300 мг/г (проти 50–120 мг/г в активованого вугілля), для важких металів (Pb^{2+} , Cd^{2+}) – до 250 мг/г, для аніонів (NO_3^- , PO_4^{3-}) – до 4 мекв/г завдяки аніонообмінним властивостям.

Шаруваті подвійні гідроксиди мають різну функціональність механізмів сорбції. Шаруваті подвійні гідроксиди діють через комбінацію механізмів. Характерними є можливість аніонообміну (заміна CO_3^{2-} на токсичні аніони), поверхнева адсорбція (ван-дер-ваальсові взаємодії), хемосорбція (зв'язування з $-\text{OH}$ групами) (Saxena & Singh, 2018).

Перевага нових сорбентів полягає в ефективності поглинання забрудників різних класів (органічних сполук, іонів металів, радіонуклідів). Одна з основних переваг синтезованих сорбентів полягає у легкості модифікації та функціоналізації. ШПГ можна покращити (рис. 4) за допомогою органічних модифікаторів (наприклад, алкілсульфонатів) для збільшення гідрофобності, магнітних наночастинок (Fe_3O_4) для швидкого відділення магнітним полем, гібридів із графеном

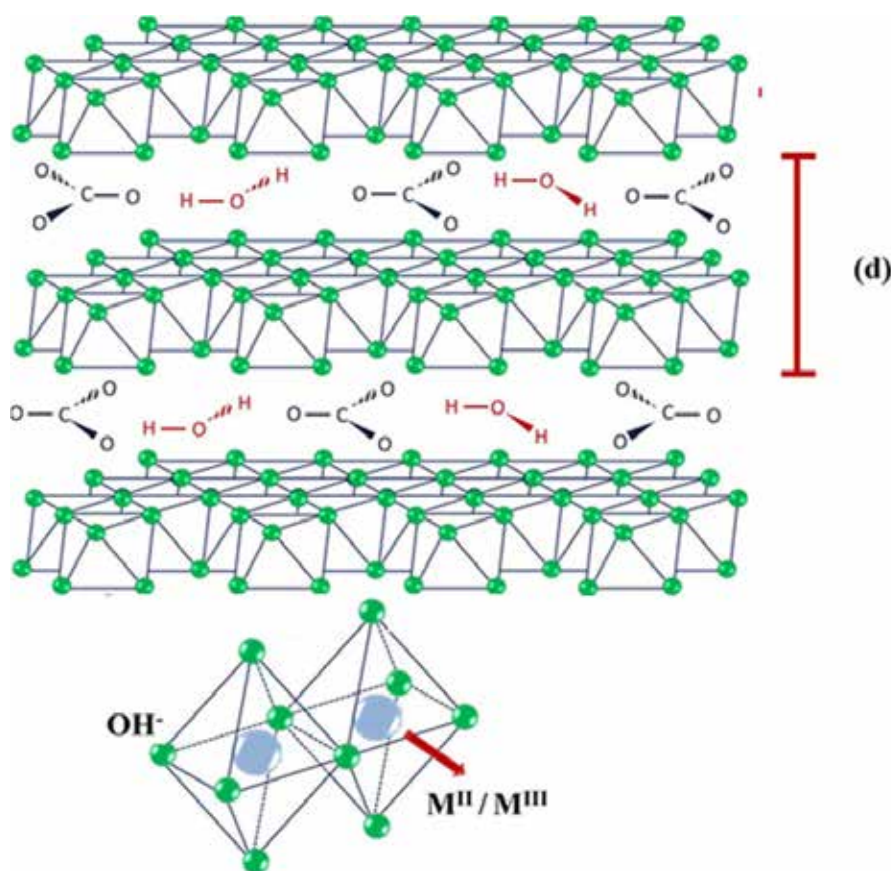


Рис. 3. Схематичне зображення структури ШПГ (ілюстрація із шарами й аніонами)

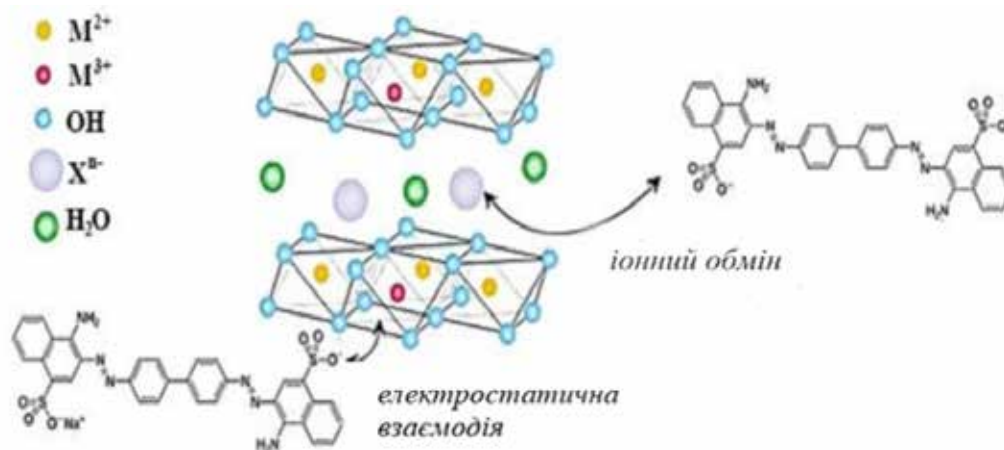


Рис. 4. Модель взаємодії шаруватих подвійних гідроксидів з органічними молекулами

для підвищення механічної міцності. Для порівняння, активоване вугілля важко модифікувати без втрати пористості. Ще однією з переваг шаруватих подвійних гідроксидів є регенерація та багаторазове використання.

Існує можливість термічної регенерації (нагрівання до 300–500 °C), хімічної регенерації (вимивання аніонів сольовими розчинами), магнітного відділення (для Fe_3O_4 – ШПГ). Для порівняння, активоване вугілля втрачає ємність після 2–3 циклів. Шаруваті подвійні гідроксиди зберігають 80–90% ефективності після 10–20 циклів.

Шаруваті подвійні гідроксиди на основі $\text{Mg}^{2+}/\text{Al}^{3+}$ безпечні для водних екосистем, а синтетичні іонообмінні смоли можуть виділяти токсичні мономери.

Матеріал і методи

У дослідженнях використовувалися синтезовані шаруваті подвійні гідроксиди різного складу: катіонний склад – Mg-Al , Zn-Al , Ni-Fe (мольне співвідношення $\text{M}^{2+}/\text{M}^{3+} = 2:1 - 4:1$); аніони в міжшаровому просторі CO_3^{2-} , NO_3^- , SO_4^{2-} ; забруднювальні речовини для дослідження нафтопродуктів, а саме бензин, дизель, мазут, феноли. Для порівняння сорбційної здатності використовували активоване вугілля, цеоліти типу Na-A.

Рисунки створено за допомогою програм: Chem Draw, Illustrator, Chem Sketch.

Методи синтезу шаруватих подвійних гідроксидів, які використовувались, – метод співосадження та аніонний обмін.

Метод співосадження полягає в такому. Суміш розчинів солей M^{2+} та M^{3+} (напр., $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 + \text{Al}(\text{NO}_3)_3$) осаджують лугом (NaOH) за pH 10–11 та 60 °C, залишають на 24 години, промивають, сушать (80 °C).

Етап старіння також вважається одним із найважливіших етапів у синтезі шаруватих подвійних гідроксидів методом співосадження. Визначальними факторами на цьому етапі є час і температура старіння. Саме від цих умов безпосередньо залежить кристалічність зразків. Було вивчено вплив часу старіння на формування однофазних і добре окристалізованих Mg-Al -ШПГ. Зі зростанням часу старіння осадів збільшується ступінь кристалічності синтезованих сорбентів.

Також було вивчено залежність формування кристалічної структури Mg-Al -ШПГ від температури старіння (Guo et al., 2024). Старіння зразків проводили протягом 6 годин, змінюючи температуру в інтервалі від 40 до 100 °C. Як і очікувалося, підвищення температури старіння сприяє утворенню структури, що має високу кристалічність. Одночасно зафіксовано деяке збільшення розмірів елементарної кристалічної комірки. Можна зробити висновок, що саме температура старіння має більший позитивний ефект на формування однофазної структури, ніж час старіння.

Метод синтезу ШПГ аніонообмінним способом заснований на «ефекті пам'яті», часто використовується для синтезу шаруватих подвійних гідроксидів. Перевагою цього методу є можливість інтеркалювати будь-які катіони й аніони у структуру ШПГ, тим самим генеруючи необхідні властивості. Цей метод дає змогу впроваджувати у структуру шаруватих подвійних гідроксидів великі органічні аніони (Metilda et al., 2018). Проте найчастіше зразки, синтезовані методом регідратації, мають низький ступінь кристалічності. Для отримання нових сполук прожарені зразки

ШПГ (змішані оксиди) поміщають у водний розчин, що містить необхідні катіони або аніони. Процес досягнення рівноваги в розчинах за кімнатної температури займає від 30 хвилин до декількох діб. Зазвичай аніонообмінні реакції проводять у нейтральних та слаболужних середовищах (рН 7 і вище), де відповідна кислота повністю депротонувана. Крім водних розчинів, аніонообмінні реакції проводять із водно-спиртових та водно-формамідних розчинів, а в рідкісних випадках – навіть із розчинів органічних розчинників, що містять надлишковий вміст інтеркальованих іонів (Lemos et al., 2018).

Аналіз питомої поверхні вимірюють методом BET. Оцінку термічної стабільності оцінювали за допомогою термогравіметричного аналізу (TGA) (Feiz et al., 2024). Аналіз фазового складу та розрахунок міжшарової відстані проводили за допомогою рентгенівської дифракції (XRD) (Cekic et al., 2019).

Сорбційні дослідження проводили таким чином. Було підготовлено модельні розчини. Концентрації забруднювальних речовин становили 10–500 мг/л, рівень рН регулювався (2–10) за допомогою HNO_3 / NaOH .

Кінетичні дослідження проводили таким чином. Контакт сорбенту з розчином (0,1–10 г/л) за 25 °С. Проби відбирались через 5, 10, 20, 60, 120 хв. Аналіз залиш-

кової концентрації визначали за допомогою газової хроматографії з мас-спектрометрією (ГХ-МС).

Проводилася термічна регенерація сорбентів. Прожарювання шаруватих подвійних гідроксидів здійснювалося за температури 300–500 °С протягом 2 годин. Оцінка ефективності після регенерації визначалася повторними циклами сорбції (до 20 разів).

Результати

Методом BET було визначено питому поверхню шаруватих подвійних гідроксидів, об'єм пір, середній діаметр пір та тип пористості. Дані представлено в таблиці 1.

Результати досліджень максимальної сорбційної ємності (q_e , мг/г) для різних нафтопродуктів представлено в таблиці 2.

Кінетика сорбції для дизельного палива за допомогою Zn-Al-NO_3 -ШПГ описується моделлю псевдодругого порядку (найкраще узгодження, $R^2 > 0.99$). Дані представлено в таблиці 3.

Ізотерми сорбції описуються моделлю Ленгмюра (моношарова адсорбція). Дані представлено в таблиці 4.

Обговорення

Дослідження показали, що шаруваті подвійні гідроксиди перевершують традиційні сорбенти (активоване вугілля, цеоліти) за сорбційною ємністю та швидкістю адсорбції нафтопродуктів. Питома поверхня

Таблиця 1

Результати BET

Сорбенти	Питома поверхня, $\text{м}^2/\text{г}$	Об'єм пір, $\text{см}^3/\text{г}$	Середній діаметр пір, нм	Тип пористості
Mg-Al-LDH	985	0,25	8,5	мезопори
Zn-Al-LDH	870	0,18	6,2	мезопори
Кальцинований Mg-Al-LDH	1200	0,45	4,7	мезопори

Таблиця 2

Максимальна сорбційна ємність ШПГ

Сорбенти	Бензин	Дизель	Мастильні оливи
Mg-Al- CO_3	145	180	120
Zn-Al- NO_3	165	195	135
Кальцинований Mg-Al-LDH	180	185	158
Активоване вугілля	85	110	75
Цеоліт Na-A	45	60	40

Таблиця 3

Кінетичні параметри сорбції дизельного палива

Параметр	Zn-Al-NO_3 -ШПГ	Активоване вугілля	Цеоліт
Час рівноваги, хв	40	90	120
Константа швидкості (k_2 , г/мг·хв)	0,0045	0,0021	0,0012
q_e (експ.), мг/г	195	110	60

Таблиця 4

Параметри ізотерм Ленгмюра

Сорбент	q_m (мг/г)	K_L (л/мг)	R^2
Zn-Al-NO ₃ -ШПГ	210	0,12	0,996
Активоване вугілля	125	0,08	0,985
Цеоліт	70	0,05	0,972

Примітка: q_m – максимальна ємність, K_L – константа спорідненості.

залежно від термічної обробки може досягати до 1200 м²/г, достатня велика для сорбції великих молекул (нафтопродуктів). Тип пор – переважно мезопори (2–50 нм), що сприяє дифузії органічних сполук. Ключові переваги шаруватих подвійних гідроксидів полягають у регульованому міжшаровому просторі (0,7–2,5 нм) для інтеркаляції аніонів (Butenko et. al., 2020).

Для активованого вугілля питома поверхня нижча (500–900 м²/г), але досить висока завдяки мікропорам (< 2 нм). Але існують обмеження, які полягають у тому, що малі пори неефективні для крупних молекул нафтопродуктів.

У цеолітів мікропориста структура (0,3–1 нм), це добре для малих молекул (вода, газ), але низька ефективність для нафтопродуктів через малий розмір пор.

Загальна ефективність сорбції. Найвища ємність спостерігається у Zn-Al-NO₃ ШПГ (до 195 мг/г для дизеля). Активоване вугілля має на 30–50% нижчу ємність, ніж шаруваті подвійні гідроксиди. Цеоліти демонструють найнижчу ефективність через малий розмір пор.

Шаруваті подвійні гідроксиди досягають процесу рівноваги у 2–3 рази швидше, ніж активоване вугілля та цеоліти. Вища константа швидкості шаруватих подвійних гідроксидів (k_2) вказує на найкращу кінетику сорбції, для отриманих сорбентів. Оптимальний діапазон рН для шаруватих подвійних гідроксидів досягається за 6–8, максимум сорбції спостерігається за рН 7 (емісія 92%).

Для активованого вугілля ефективність сорбції падає, якщо рН > 7, через депротонування поверхні.

Для цеолітів існує низька чутливість до рН, але загальна ємність у них мала.

Шаруваті подвійні гідроксиди мають вищу q_m та K_L , що підтверджує їх перевагу.

За наявності конкуруючих іонів (Na⁺, Ca²⁺) синтетичні аніонні глини зберігають 85–90% ефективності для нафтопродуктів, що свідчить про їх селективність. Для активованого вугілля ефективність падає до 50–60%. Цеоліти дуже чутливі до іонів кальцію (ефективність ≤ 40%).

ШПГ регенеруються значно ефективніше завдяки стабільності структури. Активоване вугілля деградує в разі термічної обробки.

Висновки

ШПГ в процесі поглинання нафтопродуктів перевершують активоване вугілля та цеоліти за сорбційною ємністю (до 195 мг/г проти 110 мг/г для вугілля), за швидкістю сорбції (40 хв проти 90 хв). Шаруваті подвійні гідроксиди різного складу відрізняються від інших сорбентів за селективністю у складних сумішах, можливістю регенерації (до 95 % відновлення), або їх можна перевести у шпінелеподібні структури і процес зворотної десорбції неможливий у процесі поглинання неорганічних сполук. Термічна обробка шаруватих подвійних гідроксидів призводить до структурних і фазових перетворень, що впливає на їхні фізико-хімічні властивості, утворення змішаних оксидів та можливі застосування термооброблених шаруватих подвійних гідроксидів.

Найефективнішими шаруватими подвійними гідроксидами є Zn-Al-NO₃ – для легких нафтопродуктів (бензин, дизель), Mg-Al-модифіковані ШПГ – для важких фракцій.

Шаруваті подвійні гідроксиди різного складу є перспективними сорбентами для створення промислових фільтрувальних систем для ліквідації аварійних розливів нафти та доочищення стічних вод.

Для промислового застосування слід оптимізувати витрати синтезу шаруватих подвійних гідроксидів і масштабувати технологію.

Список використаної літератури

Butenko E., Dan O., Neverova-Dziopak E., Kapustin A. Naphthalene Removal with Layered Double Hydroxides. *Geomatics and environmental engineering*. 2020. № 14 (2). P. 19–30. <https://doi.org/10.7494/geom.2020.14.2.19>.

Cekic S., Filik H., Apak R. Use of an o-aminobenzoic acid functionalized XAD-4 copolymer resin for the separation and preconcentration of heavy metal(II) ions. *Anal. Chim. Acta*. 2024. № 505 (15). P. 208–2014. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(03\)00211-3](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(03)00211-3).

Chin-Ko Yeh, Fu-Ming Tzu, Po-Yang Chen, Chitsan Lin, Han-Pin Pu, Huu Hao Ngo, Xuan-Thanh Bui. Emission characteristics of naphthalene from ship exhausts under global sulfur cap. *Science of The Total Environment*. 2023. № 902 (1). P. 112–1118. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166172>.

Crepaldi E.L. Hidróxidos duplo slamelares: síntese, estrutura, propiedades e aplicações. *Química y Física Atmosférica*. 2019. № 26. P. 300–311.

Erin E., Galizia A., Dustin F., Amanda S., Suryanarayana V., Michelle A., Janice S., Ingrid L. Health Effects of Naphthalene Exposure: A Systematic Evidence Map and Analysis of Potential Considerations for Dose–Response Evaluation. *Environ Health Perspect*. 2020. № 129 (7). P. 76–88.

Fei Ye, Jingyi Li, Yaqin Gao, Hongli Wang. The role of naphthalene and its derivatives in the formation of secondary organic aerosol in the Yangtze River Delta region, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2024. № 24 (12). P. 24–34. <https://doi.org/10.5194/acp-24-7467-2024>.

Feiz A., Ahmad H., Nezhati M., Amrollahi M., Mahmoudi F. Synthesis, characterization, and application of m-phenyldiamine-modified amberlite XAD-4 resin for preconcentration and determination of metal ions in water samples. *Water Environ. Res*. 2019. № 81 (5). P. 532–534.

Guo Y., Din B., Liu Y., Chang V., Meng S., Tian M. Preconcentration of trace metals with 2-(methylthio) aniline functionalized XAD-2 and their determination by flame atomic absorption spectrometry. *Anal. Chim. Acta*. 2024. № 50. P. 319–322.

Lemos V., Baliza P. Amberlite XAD-2 functionalized with 2-aminothiophenol as a new sorbent for on-line preconcentration of cadmium and copper. *Talanta*. 2018. № 67. P. 56–71.

Metilda P., Sanghamitra K., Gladis J., Naidu G., Prasada Rao T. Amberlite XAD-4 functionalized with succinic acid for the solid phase extractive preconcentration and separation of uranium(VI). *Talanta*. 2019. № 65. P. 192–196.

Narin I., Soylak M., Kayakirilmaz K., Elci L., Dogan M. Preparation of a chelating resin by immobilizing 1-(2-Pyridylazo)2-naphthol on amberlite XAD-16 and its application of solid phase extraction of Ni(II), Cd(II), Co(II), Cu(II), Pb(II), and Cr(III) in natural water samples. *Anal. Lett*. 2023. № 36. P. 641–644.

Pavlovic I. Adsorption of Cu²⁺, Cd²⁺ and Pb²⁺ ions by layered double hydroxides intercalated with the chelating agents diethylene triamine pentaacetate and meso-2,3-dimercaptosuccinate. *Appl. Clay Sci*. 2019. № 43. P. 125–129.

Panahi H.A., Kalal H.S., Moniri E., Nikpour M., Taheri M., Ranjbar S., Mahmoudi F. Amberlite XAD-4 functionalized with m-phenyldiamine: synthesis, characterization and applications as extractant for preconcentration and determination of rhodium (III) in water samples by Inductive Couple Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES). *Microchem. J*. 2019. № 93 (49). P. 113–120.

Saxena R., Singh A. Pyrocatechol violet immobilized amberlite XAD-2: synthesis and metal-ion uptake properties suitable for analytical applications. *Anal. Chim. Acta*. 2017. № 340. P. 285–292. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(96\)00515-6](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(96)00515-6)

References

Butenko, E., Dan, O., Neverova-Dziopak, E., & Kapustin, A. (2020). Naphthalene Removal with Layered Double Hydroxides. *Geomatics and environmental engineering*, 14 (2), 19–30. <https://doi.org/10.7494/geom.2020.14.2.19> [in English].

Cekic, S.D., Filik, H., & Apak, R. (2024). Use of an o-aminobenzoic acid functionalized XAD-4 copolymer resin for the separation and preconcentration of heavy metal(II) ions. *Anal. Chim. Acta*, 505 (15), 208–2014. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(03\)00211-3](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(03)00211-3) [in English].

Chin-Ko, Y., Fu-Ming, T., Po-Yang, C., Chitsan, L., Han-Pin, P., Huu, H., & Xuan-Thanh, B. (2023). Emission characteristics of naphthalene from ship exhausts under global sulfur cap. *Science of The Total Environment*, 902 (1), 112–1118. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166172> [in English].

Crepaldi, E.L. (2019). Hidróxidos duplo slamelares: síntese, estructura, propiedades e aplicações [Hydroxidos duplo slamelares: synthesis, structure, properties and applications]. *Química y Física Atmosférica [Chemistry and Atmospheric Physics]*, 26, 300–311 [in Spanish].

Erin, N., Galizia, A., Dustin, F., Kapraun, M., Amanda, S., Persad, V., Vulimiri, A., Janice, S., & Druwe, L. (2020). Health Effects of Naphthalene Exposure: A Systematic Evidence Map and Analysis

of Potential Considerations for Dose–Response Evaluation. *Environ Health Perspect*, 129 (7), 76–88 [in English].

Fei, Ye., Jingyi, L., Yaqin, G., & Wang, H. (2024). The role of naphthalene and its derivatives in the formation of secondary organic aerosol in the Yangtze River Delta region. *China Atmospheric Chemistry and Physics*, 24 (12), 24–34. <https://doi.org/10.5194/acp-24-7467-2024> [in English].

Feiz Bakhsh, A., Ahmad Panahi, H., Nezhati, M., Amrollahi, M., & Mahmoudi, F. (2019). Synthesis, characterization, and application of *m*-phenyldiamine-modified amberlite XAD-4 resin for preconcentration and determination of metal ions in water samples. *Water Environ. Res.*, 81 (5), 532–534 [in English].

Guo, Y., Din, B., Liu, Y., Chang, V., Meng, S., & Tian, M. (2024). Preconcentration of trace metals with 2-(methylthio) aniline functionalized XAD-2 and their determination by flame atomic absorption spectrometry. *Anal. Chim. Acta*, 50, 319–322 [in English].

Lemos, V., & Baliza, P. (2018). XAD-2 functionalized with 2-aminothiophenol as a new sorbent for on-line preconcentration of cadmium and copper. *Talanta*, 67, 56–71 [in English].

Metilda, P., Sanghamitra, K., Gladis, J., Naidu, G., Prasada R., & Amberlite T. (2019). XAD-4 functionalized with succinic acid for the solid phase extractive preconcentration and separation of uranium (VI). *Talanta*, 65, 92–196 [in English].

Narin, I., Soylak, M., Kayakirilmaz, K., Elci, L., & Dogan, M. (2023). Preparation of a chelating resin by immobilizing 1-(2-Pyridylazo)2-naphtol on amberlite XAD-16 and its application of solid phase extraction of Ni(II), Cd(II), Co(II), Cu(II), Pb(II), and Cr(III) in natural water samples. *Anal. Lett.*, 36, 641–644 [in English].

Pavlovic, I. (2019). Adsorption of Cu²⁺, Cd²⁺ and Pb²⁺ ions by layered double hydroxides intercalated with the chelating agents diethylenetriamine epentaacetate and meso-2,3-dimercaptosuccinate. *Appl. Clay Sci.*, 43, 125–129 [in English].

Panahi, H., Kalal, H., Moniri, E., Nikpour, M., Taheri, M., Ranjbar, S., & Mahmoudi, F. (2019). Amberlite XAD-4 functionalized with *m*-phenyldiamine: synthesis, characterization and applications as extractant for preconcentration and determination of rhodium (III) in water samples by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES). *Microchem. J.*, 93 (49), 113–120 [in English].

Saxena, R., & Singh, A. (2017). Pyrocatechol violet immobilized amberlite XAD-2: synthesis and metal-ion uptake properties suitable for analytical applications. *Anal. Chim. Acta*, 340, 285–292. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(96\)00515-6](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(96)00515-6) [in English].

Отримано: 24.04.2025

Прийнято: 15.05.2025



УДК 504.05:504.53:550.4:581.5
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.30>

ВПЛИВ ТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ НА ҐРУНТИ САНІТАРНО-ЗАХИСНИХ ЗОН ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ МІСТА ЖИТОМИРА

О. М. Василенко¹, І. П. Онищук²

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю оцінювання впливу техногенного забруднення на ґрунти санітарно-захисних зон (СЗЗ) промислових підприємств, що є важливим для гарантування екологічної безпеки урбанізованих територій. Особливо актуальним це питання є для територій, де перекриваються санітарно-захисні зони кількох промислових об'єктів, що може посилювати негативні екологічні наслідки.

Метою дослідження є визначення фізико-хімічних властивостей ґрунтів, умісту важких металів (Pb, Cd, Cu, Zn, Co, Ni) і рівня радіаційного фону в межах санітарно-захисних зон підприємства з виробництва полімерних волокон у місті Житомирі.

Методи дослідження включали відбір проб ґрунту в межах санітарно-захисної зони, лабораторне визначення кислотності ґрунтів (активної, обмінної, гідролітичної), аналіз концентрацій важких металів методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії, а також вимірювання радіаційного фону (γ - та β -випромінювання). Проведено геоботанічний аналіз рослинного покриву з використанням програмного забезпечення "Turboveg" для оцінювання ступеня синантропізації та трансформації рослинних угруповань під впливом техногенного навантаження.

Результати засвідчили, що кислотність ґрунтів перебуває в межах нейтрального та слабколужного середовища. Виявлено перевищення гранично допустимих концентрацій важких металів (Pb, Cd, Cu, Co), що свідчить про суттєве техногенне навантаження. Радіаційний фон не перевищує норму. Геоботанічний аналіз виявив значне поширення синантропних та інвазивних видів рослин, зокрема *Solidago canadensis* L.

У роботі встановлено просторові особливості розподілу важких металів і їхня залежність від кислотності ґрунтів на території перекриття санітарно-захисних зон підприємств.

Практична значущість дослідження полягає у використанні отриманих результатів для еколо-

¹ кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: Vasylenko-O@zu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-3283-6980

² кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: Onyshchuk-I@zu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2847-8570

гічного моніторингу промислових територій, оцінювання рівня забруднення та розроблення рекомендацій щодо управління техногенним навантаженням на міські екосистеми.

Ключові слова: важкі метали, радіаційний фон, санітарно-захисна зона, техногенний вплив, екологічний моніторинг, промислове забруднення, геоботанічний аналіз.

THE IMPACT OF TECHNOGENIC POLLUTION ON SOILS OF SANITARY PROTECTION ZONES OF INDUSTRIAL ENTERPRISES IN ZHYTOMYR

O. M. Vasylenko, I. P. Onyshchuk

The relevance of the study is due to the need to assess the impact of technogenic pollution on soils of sanitary protection zones (SPP) of industrial enterprises, which is important for ensuring the ecological safety of urbanized areas. This issue is especially relevant for areas where the SPPs of several industrial facilities overlap, which can exacerbate negative environmental consequences.

The purpose of the study is to determine the physicochemical properties of soils, the content of heavy metals (Pb, Cd, Cu, Zn, Co, Ni) and the level of background radiation within the SPP of a polymer fiber production enterprise in the city of Zhytomyr.

The research methods included soil sampling within the sanitary protection zone, laboratory determination of soil acidity (active, exchangeable, hydrolytic), analysis of heavy metal concentrations by atomic absorption spectrophotometry, and measurement of background radiation (γ - and β -radiation).

A geobotanical analysis of vegetation cover was carried out using the Turboveg software to assess the degree of synanthropization and transformation of plant communities under the influence of technogenic load.

The results showed that the acidity of the soils is within the neutral and weakly alkaline environment. Exceedance of the maximum permissible concentrations of heavy metals (Pb, Cd, Cu, Co) was detected, which indicates a significant technogenic load. The radiation background does not exceed the norm.

*Geobotanical analysis revealed a significant spread of synanthropic and invasive plant species, in particular *Solidago canadensis* L.*

The scientific novelty of the work lies in establishing the spatial features of the distribution of heavy metals and their dependence on soil acidity in the overlap zone of the enterprises' SPZ.

The practical significance of the study lies in using the obtained results for environmental monitoring of industrial areas, assessing the level of pollution and developing recommendations for managing technogenic load on urban ecosystems.

Key words: heavy metals, radiation background, sanitary protection zone, technogenic impact, environmental monitoring, industrial pollution, geobotanical analysis.

Вступ

Сучасні промислові зони характеризуються інтенсивним техногенним навантаженням, що призводить до значних екологічних ризиків, зокрема забруднення ґрунтів важкими металами, органічними сполуками й іншими токсичними речовинами. Особливої уваги потребують території, де перекриваються санітарно-захисні зони (далі – СЗЗ) кількох підприємств, оскільки їхні викиди можуть взаємодіяти, змінюючи мобільність і біодоступність забруднювальних речовин.

У місті Житомирі, на вул. Промисловій, розташована значна кількість виробничих підприємств, зокрема ті, що спеціалізуються на металообробці, виробництві гнучкої упаковки, переробці полімерів і випуску шкіряних виробів. Викиди цих підприємств можуть змінювати фізико-хімічні властивості ґрунту, спричиняти накопичення

токсичних компонентів і трансформацію рослинного покриву. Зокрема, шкіряне виробництво є джерелом хромових сполук, які можуть потрапляти в повітря, ґрунти та водні ресурси, створюючи екологічні загрози. Водночас металообробка сприяє осадженню аерозолів, що містять частинки важких металів.

Забруднення ґрунтів у промислових районах не лише впливає на їхню екологічну функцію, а й може спричиняти деградацію земель, проникнення токсичних речовин у водоносні горизонти, що несе загрозу для здоров'я населення. Особливої актуальності ця проблема набуває через відсутність системного моніторингу стану ґрунтів у межах СЗЗ, що ускладнює оцінювання реального рівня забруднення та впровадження ефективних заходів із його мінімізації.

Актуальність дослідження полягає в необхідності комплексного аналізу

впливу промислових підприємств на стан ґрунтів у межах санітарно-захисних зон. Дослідження спрямоване на визначення рівня забруднення важкими металами, аналіз впливу забруднення на рослинний покрив у межах СЗЗ підприємства з виробництва гнучкої упаковки, що розташоване на території перекриття санітарно-захисних зон. Отримані результати можуть стати основою для розроблення екологічних стратегій зменшення техногенного навантаження та впровадження сучасних технологій очищення і відновлення ґрунтів.

Техногенне забруднення ґрунтів, особливо у промислових зонах, залишається однією із ключових екологічних проблем сучасності. Основна увага наукових досліджень спрямована на ідентифікацію забруднювачів, моделювання їх поширення, аналіз впливу на екосистеми та розроблення ефективних заходів для управління екологічними ризиками. Зокрема, у праці Т.Г. Іващенко й І.Д. Пушкарьової акцентовано увагу на виявленні небезпечних речовин, як-от свинець, кадмій і мідь, у ґрунтах територій промислових підприємств. Автори наголошують, що ці елементи становлять серйозну екологічну загрозу, а оцінювання їх розподілу необхідне для управління техногенним навантаженням (Іващенко і Пушкарьова, 2014). У дослідженні Г.А. Кроїка розглядаються токсикологічні наслідки накопичення важких металів у ґрунтах промислових агломерацій, підкреслено їхню здатність до міграції через трофічні ланцюги, що створює додаткові ризики для здоров'я людини та функціонування екосистем (Кроїк, 2011).

Сучасні програмні рішення відіграють важливу роль у вивченні екологічного стану ґрунтів. Наприклад, програма "Turboveg for Windows", описана в роботі S.M. Hennekens, дозволяє аналізувати геоботанічні дані та впорядковувати інформацію про рослинний покрив (Hennekens, 2009). У дослідженні І.В. Хом'яка та його колег підкреслено значення класифікації рослинності для моделювання поширення забруднень, оскільки синтаксономічні аналізи допомагають краще зрозуміти ризики, пов'язані з техногенними впливами, і оцінити ступінь синантропізації екосистем (Хом'як, 2022; Хом'як і Хом'як, 2024).

У контексті міжнародних досліджень у публікації "Soil pollution and health" (European ..., 2021) звернено увагу на небезпеку промислових відходів, які є джерелом важких металів і органічних забруд-

нювачів, здатних накопичуватися у ґрунтах. Автори наголошують на інтеграції моніторингу ґрунтів з екологічною політикою, спрямованою на зниження забруднення. У роботі "The chemical nature and properties of soil contaminants" (Food ..., 2021) описано природу основних забруднювачів, механізми їх взаємодії із ґрунтом і вплив на його властивості. Окремо акцентовано на втраті родючості земель і необхідності впровадження технологій ремедіації. У статті "Soil pollution indices and health risk assessment of metal (loid)s in industrial areas" (Mohiuddin et al., 2024) проаналізовано рівні забруднення ґрунтів металами у промислових районах. Автори виявили, що концентрація кадмію, свинцю та миш'яку в таких районах значно перевищує допустимі норми, що створює високі ризики для здоров'я людей.

Отже, сучасні дослідження підтверджують необхідність комплексного підходу до моніторингу техногенного забруднення ґрунтів. Це передбачає ідентифікацію джерел забруднення, аналіз рослинного покриву, впровадження сучасних методів моделювання екологічної небезпеки, а також розроблення стратегій сталого використання ґрунтових ресурсів.

Вирішення проблеми забруднення ґрунтів у зонах впливу хімічної промисловості ускладнюється низкою невирішених питань. Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах відсутності системного моніторингу, оскільки в Україні відсутня систематична програма моніторингу стану ґрунтів у зонах впливу конкретних хімічних підприємств. Така ситуація призводить до значних прогалин у даних, які необхідні для оцінювання реального стану довкілля, прогнозування екологічних ризиків і впровадження своєчасних заходів із запобігання подальшій деградації ґрунтів. Наявні дослідження є фрагментарними та часто обмежуються окремими регіонами, що ускладнює формування цілісної картини.

Ще однією важливою проблемою є відсутність актуальних локальних даних про специфічні забруднювачі ґрунтів, які генерує промисловість. Брак такої інформації значно ускладнює розроблення ефективних заходів із контролю забруднення та реабілітації ґрунтів у зонах техногенного впливу.

Водночас наявний міжнародний досвід у сфері оцінювання та відновлення ґрунтів не завжди може бути ефективно адаптований до українських реалій. Більшість

запропонованих підходів розроблені для стабільних регіонів і не враховують специфіки забруднення та техногенного навантаження в умовах воєнних дій чи нестабільної інфраструктури.

Нарешті, відсутність інтегрованого підходу до екологічного управління ґрунтами на державному рівні залишається суттєвою проблемою. Чинна політика не враховує всіх аспектів впливу промислових підприємств на ґрунти та не передбачає ефективних інструментів для моніторингу, аналізу та впровадження заходів із реабілітації. Це створює додаткові перешкоди для сталого управління ґрунтовими ресурсами.

Метою дослідження було встановлення впливу діяльності підприємства з виробництва полімерних матеріалів на стан ґрунтів у межах санітарно-захисної зони. Дослідження передбачало визначення рівня кислотності та концентрацій важких металів у ґрунтового покриві, а також оцінювання змін у рослинному угрупованні під впливом хімічного навантаження.

Матеріал і методи

У процесі дослідження було здійснено відбір об'єднаних змішаних проб ґрунту в межах санітарно-захисної зони підприємства з виробництва полімерних матеріалів. Відбір проб проводився відповідно до стандартних методик, з урахуванням просторової варіабельності забруднення. Проби відбиралися у випадково визначених точках на різній відстані від основних виробничих територій підприємств, що дозволило забезпечити репрезентативність даних. Ґрунтові зразки відбиралися з поверхневого шару та із глибини 20 см на п'яти майданчиках: П1 – на відстані 50 м, П2 – 75 м, П3 – 100 м, П4 – 125 м, П5 – 150 м.

Для визначення кислотності ґрунтів проводили три види аналізів: оцінювали активну, обмінну та гідролітичну кислотність. Активну кислотність оцінювали шляхом підготовки водної витяжки: наважку повітряно-сухого ґрунту масою 6,00 г заливали 30 мл дистильованої води, перемішували в шейкері протягом 20 хвилин, після чого відбирали порцію розчину над осадом і вимірювали рН за допомогою рН-метра зі скляним електродом (І-117) (Набиванець та ін., 1996).

Обмінну кислотність визначали методом сольової витяжки за допомогою 1 М розчину KCl. Наважку ґрунту масою 20,00 г заливали 50 мл 1 М розчину KCl, перемішували протягом 15 хвилин, після чого вимірювали

рН у витяжці за допомогою рН-метра (І-117) (Набиванець та ін., 1996).

Гідролітичну кислотність визначали на основі сольової витяжки, яку готували відповідно до методики (Набиванець та ін., 1996). Для цього наважку повітряно-сухої проби ґрунту масою 40,00 г заливали 100 мл 1 М розчину ацетату натрію, перемішували в шейкері протягом 30 хвилин, після чого отриманий розчин пропускали через паперовий фільтр. П'ятдесят мілілітрів прозорого фільтрату титрували 0,1 М розчином NaOH у присутності фенолфталеїну до появи блідо-рожевого забарвлення. Гідролітичну кислотність ґрунту ($H_{\text{гидр}}$) розраховували за формулою:

$$H_{\text{(гидр)}} = \frac{C(\text{NaOH}) \cdot V(\text{NaOH})}{V(\text{сольової витяжки})} \times 1,75,$$

де $V_{(\text{NaOH})}$ – об'єм розчину, який витратили на титрування 50 мл ґрунтової витяжки; $C_{(\text{NaOH})}$ – концентрація розчину для титрування; 1,75 – коефіцієнт перерахунку повної гідролітичної кислотності на 1 кг ґрунту (Набиванець та ін., 1996).

Для проведення аналізу вмісту важких металів (Pb^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+}) у ґрунтових пробах використовували метод кислотної витяжки. Наважку сухого ґрунту масою 5 г заливали 25 мл 1 М розчину HNO_3 та перемішували протягом 30 хвилин. Отриманий розчин фільтрували через паперовий фільтр 2–3 рази. Уміст катіонів у витяжці (мг/л) визначали методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії з використанням полум'яного атомно-абсорбційного спектрофотометра С115-М (Selmi, Україна).

Атомізацію здійснювали полум'яним способом із використанням суміші ацетилен – повітря. Вимірювання проводили на відповідних довжинах хвиль для кожного елемента: Pb – 283,3 нм, Cd – 228,8 нм, Cu – 324,7 нм, Ni – 232,1 нм, Zn – 213,9 нм. Ширина щілини спектрофотометра становила 0,5 см. Концентрацію в розчині визначали методом калібрувального графіка.

Для оцінювання радіоактивного забруднення ґрунтів було використано радіометр МКС-05 «Терра». Радіометр дозволяв визначати еквівалентну дозу та потужність еквівалентної дози γ -випромінювання в мкЗв/год, а також поверхневу щільність потоку β -частинок (Гудков та ін., 2019).

Рослинні угруповання на досліджуваній території оцінювали за допомогою геоботанічного опису й аналізу рослинного складу.

Обробку отриманих даних здійснювали із використанням програми “Turboveg for Windows” (Hennekens, 2009). Визначення біотопів і класифікація рослинності проводилися відповідно до Національного каталогу біотопів України (Національний ..., 2018).

Застосовані методики дозволили забезпечити комплексний підхід до оцінювання стану ґрунтів у санітарно-захисній зоні підприємств із виробництва полімерних матеріалів. Поєднання хімічних, фізико-хімічних і геоботанічних методів дослідження дозволило отримати репрезентативні результати, необхідні для проведення аналізу впливу техногенного навантаження на екосистеми промислових зон.

Результати

У результаті проведених досліджень було встановлено, що кислотність ґрунтового покриву в межах санітарно-захисної зони підприємства з виробництва полімерних матеріалів варіює залежно від просторового розташування пробовідбірних майданчиків. Дані щодо активної, обмінної та гідролітичної кислотності ґрунтів наведені в таблиці 1.

Активна кислотність ($pH\ H_2O$), яка визначає концентрацію водневих іонів у ґрунтовому розчині, перебувала в діапазоні 6,62–7,16. Це свідчить про нейтральний або слабколужний характер ґрунтового середовища в дослідженій зоні. Найменше значення pH було зафіксовано на майданчику П4 (125 м) – 6,62, що свідчить про слабку кислотність ґрунту в цій ділянці. Максимальний рівень активної кислотності спостерігався на майданчику П3 (100 м) – 7,16, що може бути пов'язано з особливостями складу ґрунтового покриву або локальними чинниками впливу промислових викидів.

Показники обмінної кислотності ($pH\ KCl$) були в межах 6,68–7,26, що свідчить про досить стабільний стан ґрунтового буферного комплексу. Вищі значення pH обмінної кислотності зафіксовано на майданчику П3 (7,26), що свідчить про здатність ґрунту

до нейтралізації кислотних компонентів. Найменше значення обмінної кислотності спостерігалось на ділянці П4 (6,68), що може свідчити про більший уміст рухомих кислотних форм або потенційну мобільність важких металів у цій зоні.

Гідролітична кислотність ґрунтів, яка характеризує їхню здатність до сорбційного накопичення іонів водню, коливалася в межах 0,00083–0,0083 ммоль H^+ /кг. Найвищий рівень гідролітичної кислотності був зафіксований у пробах з майданчика П3 (100 м) – 0,0083 ммоль H^+ /кг, що може бути свідченням деградації ґрунту або підвищеного рівня його виснаження. Найнижчий рівень гідролітичної кислотності встановлено для майданчика П2 (75 м) – 0,00083 ммоль H^+ /кг, що може вказувати на кращі умови для збереження ґрунтової структури.

Отримані результати свідчать про те, що ґрунти в межах санітарно-захисної зони підприємства з виробництва полімерних матеріалів не мають значних відхилень у кислотності, що могло б свідчити про надмірне антропогенне навантаження. Усі досліджені параметри – у межах оптимальних значень для більшості природних ґрунтів із нейтральним і слабколужним середовищем.

Отримані результати вмісту іонів важких металів дозволяють оцінити ступінь забруднення ґрунтового покриву та визначити просторові закономірності накопичення важких металів залежно від відстані від потенційного джерела викидів. У таблиці 2 наведено концентрації досліджуваних металів у відібраних пробах.

Для оцінювання рівня забруднення отримані результати порівнювалися з нормативами гранично допустимих концентрацій (далі – ГДК), затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від 15 грудня 2021 р. № 1325 «Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин» (Про затвердження ..., 2021).

Таблиця 1

Показники активної і потенційної кислотності ґрунтових проб досліджуваної території

№ проби	Активна кислотність	Обмінна кислотність	Гідролітична кислотність
П1	6,97	7,05	0,0012
П2	6,83	6,94	0,00083
П3	7,16	7,26	0,0083
П4	6,62	6,68	0,0012
П5	7,05	6,88	0,00097

Таблиця 2

Вміст іонів важких металів у досліджуваних пробах

Вміст іонів важких металів (мг/кг)	ГДК мг/кг	П1	П2	П3	П4	П5
Cd *, **	1,5	0,615	2,9	0,245	0,285	0,485
Pb*, ***, ****	6	9,85	6,45	10,1	24,8	6,1
Cu	3	5,55	5,25	6,65	9,25	3,4
Zn*	150	10,0214	9,47485	12,3538	16,9156	8,12015
Co	50	66,04495	60,04085	70,06895	32,8947	51,4627
Ni *, **	40	7,75	21,7	7,1	4,3	5,7

Примітка: Характеристика шкідливих хімічних речовин за характером дії на організм людини: * – канцерогенні (бластомогенні) сполуки: плумбум (Pb), цинк (Zn), нікель (Ni); ** – сенсibiliзуючі хімічні речовини або алергени (нікель (Ni)); *** – мутагенні речовини (плумбум (Pb)); **** – проявляє репродуктивну токсичність (плумбум (Pb)).

Концентрація кадмію в досліджених пробах змінювалася в межах 0,245–2,9 мг/кг, причому у пробі П2 зафіксовано перевищення ГДК (1,5 мг/кг) в 1,93 раза.

Вміст свинцю коливався від 6,1 мг/кг (П5) до 24,8 мг/кг (П4). Значне перевищення нормативного рівня (6 мг/кг) встановлено у пробах П1 (1,64 раза), П2 (1,08 раза), П3 (1,68 раза) та П4 (4,13 раза).

Концентрація міді (Cu) у ґрунті варіювала від 3,4 мг/кг (П5) до 9,25 мг/кг (П4), що у пробах П1, П2, П3 та П4 перевищувало допустимий рівень (3 мг/кг) відповідно в 1,85, 1,75, 2,22 та 3,08 раза.

Вміст цинку (Zn) змінювався в межах 8,12–16,91 мг/кг, що не перевищує встановленого нормативу (150 мг/кг).

Кобальт (Co) у пробах ґрунту містився в кількості 32,89–70,06 мг/кг. У зразках П1 (1,32 раза), П2 (1,2 раза) та П3 (1,4 раза) його концентрація перевищувала ГДК (50 мг/кг).

Концентрація нікелю (Ni) була в межах 4,3–21,7 мг/кг, що не перевищує нормативних значень (40 мг/кг).

Отримані результати свідчать про перевищення допустимих рівнів Cd, Pb, Cu та Co

в окремих пробах, що вказує на наявність забруднення важкими металами в досліджуваній зоні.

Дослідження рівня радіоактивного забруднення ґрунтового покриву в межах санітарно-захисної зони підприємства охоплювало вимірювання потужності γ -випромінювання та поверхневої щільності β -частинок. Необхідність проведення цього аналізу була зумовлена виявленням високих концентрацій активної форми іонів Co^{2+} у змішаних пробах, що могло свідчити про потенційну наявність радіоактивних ізотопів кобальту у ґрунтовому середовищі.

Отримані результати свідчать, що потужність γ -випромінювання в досліджених пробах змінювалася в межах 0,15–0,3 мкЗв/год, що не перевищує встановленого нормативного рівня 0,3 мкЗв/год для екологічної безпеки (табл. 3). Максимальне значення зафіксовано у пробі П1 (0,3 мкЗв/год), що відповідає гранично допустимому рівню, тоді як найнижчі показники спостерігалися у пробах П3 (0,16 мкЗв/год) та П5 (0,15 мкЗв/год), що свідчить про їхню радіаційну безпеку.

Таблиця 3

Результати радіологічного дослідження проб

Середні значення	П1	П2	П3	П4	П5	Норма мкЗв/год
Потужність γ	0,3	0,26	0,16	0,24	0,15	0,3*
Поверхнева щільність потоку β -частинок част./ $(cm^2 \times хв)$.	0,04	0,06	0,03	0	0	0,67**

Примітка. * – допустима потужність γ випромінювання на годину для населення становить 0,3 мкЗв/год (це значення базується на загальнорічній дозі 0,1 мЗв (100 мкЗв) і передбачає, що людина буде піддаватися впливу цієї дози протягом усього року; ** – допустима норма поверхневої щільності β -потoku для населення становить $0,04 \cdot 10^3$ частинок на cm^2 на годину** (у перерахунку на хвилини: $0,04 / 60 = 0,67$ част./ $(cm^2 \times хв)$).

Аналіз поверхневої щільності потоку β -частинок засвідчив незначні значення, що були в межах 0–0,06 част./см²·хв. У пробах П4 та П5 активність β -випромінювання не виявлено (0 част./см²·хв), а максимальне значення (0,06 част./см²·хв) зафіксовано у пробі П2. Це свідчить про відсутність суттєвого накопичення β -випромінюючих радіонуклідів у ґрунтах досліджуваної території.

Отримані результати підтверджують, що рівень радіоактивного забруднення ґрунтового покриву в межах санітарно-захисної зони не перевищує нормативних значень і не становить екологічної загрози. Виявлені в попередніх хімічних аналізах підвищені концентрації іонів Co^{2+} не корелюють із радіологічними показниками, що свідчить про відсутність значної присутності радіоактивних ізотопів кобальту у ґрунтах досліджуваної території.

Було встановлено, що рослинність досліджуваної території належить до 5 класів, 7 порядків, 8 союзів, 11 асоціацій, за класифікацією Ж. Браун-Бланке. Синтаксономічна схема рослинних угруповань така:

Molinio-Arrhenatheretea R.Tx 1937: *Galietaia veri* Mirk. et Naum. 1986: *Agrostion vinealis* Sipaylova, Mirk., Shelyag et V.Sl. 1985: *Agrostio vinealis-Calamagrostietum epigei* Shelyag-Sosonko et al. ex Shelyag-Sosonko et al. 1985, *Agrostietum vinealis-tenuis* Shelyag et al. 1985, *Poëtum angustifoliae* Shelyag-Sosonko et al. 1986, *Achillea submiefolium-Dactyletum glomeratae* Smetana, Derpoluk, Krasova 1997; *Arrhenatheretalia elatioris* Tüxen 1931: *Cynosurion cristati* Tx. 1947: *Lolietum perennis* Gams 1927.

Rhamno-Prunetea Rivas Goday et Borja Carbonell ex Tüxen 1962: *Prunetalia spinosae* R.Tx 1952: *Prunion spinosae* Soó (1931) 1940: *Swido sanguinei-Crataegetum leiomonogynae* Fitsailo 2005.

Artemisietea vulgaris Lohmeyer et al. ex von Rochow 1951: *Agropyretalia intermedio-repentis* T. Müller et Görs 1969: *Convolvulo arvensis-Agropyron repentis* Görs 1967: *Agropyretum repentis* Felföldy 1942; *Onopordetalia acanthii* Br.-Bl. et Tx. ex Klika et Hadač 1944: *AOnopordion acanthii* Br.-Bl et al. 1926: *Potentillo argenteae-Artemisietum absinthii* Faliński 1965, *Tanaceto-Artemisietum vulgaris* Br.-Bl (1931) 1949.

Polygono-Poëtea annuae Rivas-Martinez 1975: *Polygono arenastri-Poëitalia annuae* Tx. in Géhu et al. 1972 corr. Rivas Martinez et al. 1991: *Polygono-Coronopodion* Sissingh 1969: *Polygonetum arenastri* Gams 1927

corr. Lániková in Chytrý 2009, *Saginion procumbentis* Tx. et Ohba in Géhu et al. 1972: *Poetum annuae* Gams 1927.

Plantaginetea majoris Tx. et Preising ex von Rochow 1951: *Potentillo-Polygonetalia avicularis* R. Tx. 1947: *Plantagini-Prunellion* Eliáš 1980: *Potentilletum reptantis* Eliáš 1974.

Обговорення

Отримані результати дослідження свідчать про складні закономірності розподілу важких металів у межах санітарно-захисної зони підприємства з виробництво полімерних волокон. Виявлені просторові варіації концентрацій забруднювальних речовин можуть бути зумовлені техногенним впливом, а саме, діяльністю промислових підприємств, що функціонують у цій зоні. Особливу роль у рівні забруднення відіграє перекриття санітарно-захисних зон (СЗЗ) різних виробництв, які можуть мати різний хімічний склад викидів, що ускладнює встановлення домінантного джерела забруднення. Беручи до уваги наявність у цій зоні підприємств, пов'язаних із металообробкою, виготовленням ізоляційних матеріалів, переробкою полімерів і виготовленням шкіряних виробів, хімічний склад ґрунтів формується під впливом множинних антропогенних чинників.

Перекриття СЗЗ різних підприємств може сприяти кумуляції забруднення, посилювати його негативний вплив на довкілля. За таких умов викиди різних виробництв можуть взаємодіяти, утворювати додаткові токсичні сполуки або ж змінювати хімічну рухливість окремих елементів у ґрунтового середовищі. Найвищі концентрації свинцю, міді та цинку, зафіксовані у пробі П4, можуть бути результатом осадження аерозольних частинок з атмосферних викидів підприємств, що здійснюють металообробку та фарбування матеріалів. Підвищені рівні кадмію та нікелю у пробі П2 можуть бути пов'язані з діяльністю підприємств з обробки металів із використанням кадмієвих сплавів. Висока мобільність цих металів порівняно з іншими елементами зумовлює їхню здатність до переміщення у ґрунтових горизонтах, що може пояснювати їхню локалізовану присутність у зонах дослідження.

Зниження рівня рН ґрунту сприяє підвищенню концентрації Pb, Cu та Zn (див. табл. 2), що узгоджується із загальновідомими закономірностями їхньої розчинності в кислому середовищі (див. табл. 1). Це особливо виражено в зоні з найнижчими показниками кислотності (проба П4), де зафіксовані

максимальні концентрації важких металів, що підвищує їхню біодоступність і мобільність. Водночас висока гідролітична кислотність (див. табл. 1, проба ПЗ) сприяє зменшенню рухливості металів, що пояснює нижчі рівні забруднення на цій ділянці.

Результати радіологічного аналізу (див. табл. 3) не виявили значних відхилень у рівні γ -випромінювання та щільності потоку β -частинок, що свідчить про відсутність радіоактивного забруднення в межах санітарно-захисної зони підприємств. Це означає, що підвищені концентрації кобальту у пробах не пов'язані з його радіоактивними ізотопами, а є наслідком виробничої діяльності, імовірно, металургійного характеру. Зважаючи на те, що кобальт широко використовується в металообробці та виробництві електронних компонентів, його підвищений уміст може бути наслідком діяльності підприємств з такими виробничими процесами.

Аналіз результатів дослідження свідчить, що розподіл важких металів у межах досліджуваної території є нерівномірним і має просторову специфіку, зумовлену фізико-хімічними властивостями ґрунту (див. табл. 1) та впливом промислових викидів (див. табл. 2). Установлено, що перевищення нормативних значень ГДК для Cd, Pb, Cu та Co в окремих пробах свідчить про наявність забруднення важкими металами, що потребує подальшого моніторингу й оцінювання його довгострокових наслідків. Виявлена залежність між кислотністю ґрунту та накопиченням важких металів підтверджує необхідність комплексного аналізу фізико-хімічних характеристик ґрунту для визначення його здатності до акумуляції та мобілізації токсичних елементів.

Виявлені закономірності підтверджують необхідність комплексного підходу до оцінювання екологічного стану, який охоплює не лише фізико-хімічні характеристики ґрунту, а й біологічні показники, що можуть слугувати додатковими індикаторами техногенного навантаження. Одним із ключових елементів такої оцінки є аналіз рослинного покриву, який відображає довготривалі зміни у структурі екосистеми під впливом забруднення. Геоботанічне дослідження території дозволяє виявити, яким чином фітогенно-ценотичні процеси реагують на зміну хімічного складу ґрунту, оцінити рівень синантропізації флори, а також визначити можливі негативні тенденції у трансформації природних фітоценозів.

Флора усіх рослинних угруповань на дослідженій території, включно із природною, дуже синантропізована. У ній трапляються як аборигенні, так і чужинські антропопотолерантні види (Хом'як і Хом'як, 2024). Дуже великі площі охоплює інвазійний вид – трансформер золотушник канадський (*Solidago canadensis* L.) (Тарарай і Хом'як, 2019; Соловійова і Хом'як, 2021). Рослини цього виду приваблюють комах-запилювачів, зокрема й медоносних бджіл (*Apis mellifera* L.) (Хом'як, 2018). Отже, мідь і свинець можуть потрапити у продукти бджільництва, від них у людський організм (Хом'як і Бурлака, 2005).

Рослинний покрив досліджуваної території істотно порушений і розріджений. Це може спричиняти підняття та перенесення пилу під час сильних поривів вітру чи пересування техніки. Разом із пилом у дихальні шляхи людини і тварин можуть потрапляти присутні в ньому іони важких металів.

Висновки

Отримані результати дослідження засвідчують значний вплив промислової діяльності на екологічний стан ґрунтового покриву в межах санітарно-захисної зони (СЗЗ) підприємств, розташованих на території вул. Промислової в місті Житомирі. Виявлено перевищення гранично допустимих концентрацій важких металів (Cd, Pb, Cu, Co), що свідчить про техногенне забруднення, з нерівномірним просторовим розподілом. Найвищі концентрації свинцю, міді та цинку зафіксовано у пробі П4, що може бути пов'язано з атмосферними викидами підприємств металургійної та хімічної промисловості. Підвищений рівень кадмію та нікелю у пробі П2 свідчить про специфічні джерела забруднення, пов'язані з обробкою металів і використанням полімерних матеріалів.

Аналіз кислотності ґрунтів показав переважно нейтральне або слабколужне середовище, однак зниження рН в окремих пробах сприяє підвищенню мобільності важких металів. Радіологічні показники перебувають у межах нормативних значень, що виключає ймовірність радіоактивного забруднення.

Геоботанічне дослідження виявило високу синантропізацію рослинного покриву, зокрема значне поширення інвазійних видів, як-от *Solidago canadensis* L., що свідчить про трансформацію екосистем під впливом забруднення.

Необхідні подальший моніторинг стану ґрунтів, оцінювання довготривалих тенденцій забруднення та впровадження заходів

із рекультивації. Доцільно використовувати біоіндикаційні методи та геоінформаційні технології для просторового аналізу забруднення, що сприятиме ефективному управлінню промисловими зонами та зменшенню екологічних ризиків.

Список використаної літератури

Гудков І.М., Кашпаров В.О., Паренюк О.Ю. Радіоекологічний моніторинг : навчальний посібник. Київ, 2019. 188 с.

Іващенко Т.Г., Пушкарєва І.Д. Визначення забруднюючих речовин ґрунту територій промислових підприємств та ідентифікація їх екологічної небезпеки. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2014. № 4. С. 102–105.

Кроїк Г.А. Токсикологічні аспекти накопичення та розподілу важких металів у ґрунтах промислових агломерацій. *Біорізноманіття та роль тварин в екосистемах* : матеріали VI Міжнародної наукової конференції. Дніпропетровськ : Вид-во ДНУ, 2011. С. 15–18.

Національний каталог біотопів України / за ред. А.А. Куземко та ін. Київ : ФОП Ю.Я. Клименко, 2018. 442 с.

Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин : постанова Кабінету Міністрів України від 15 грудня 2021 р. № 1325. *Офіційний вісник України*. 2021. № 101 [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1325-2021-p> (дата звернення: 03.03.2025).

Соловійова А., Хом'як І.В. Поведінкові стратегії інвазійних видів рослин. *Сталий розвиток країни в рамках європейської інтеграції* : Усеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених. Житомир : ЖДТУ, 2021. С. 44.

Тарарай А.М., Хом'як І.В. Інвазійна флора фітоценозів класу *Artemisietea vulgaris* Lonm. Rrsa et R. TX. 1950 міста Житомир. *Сталий розвиток країни в рамках європейської інтеграції* : Усеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених. Житомир, 2019. С. 29.

Хом'як І.В., Бурлака В.А. Характеристики екосистем Словечансько-Овруцького кряжу, як об'єктів і кормової бази бджільництва. *Вісник Державного агроєкологічного університету*. 2005. № 2. С. 23–252.

Хом'як І.В. Вплив інвазій видів-трансформерів на динаміку рослинності перелогів Українського Полісся. *Біоресурси і природокористування*. 2018. Т. 10. № 1–2. С. 29–35.

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>.

Хом'як І.В., Хом'як О.І. Потенціал спонтанного тераформінгу ландшафтів суходолу з позицій сучасної теорії динаміки екосистем. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 8. С. 289–299. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.30>.

European Environment Agency. Soil pollution and health 2021. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/zero-pollution/health/soil-pollution> (дата звернення: 26.01.2025).

Food and Agriculture Organization of the United Nations. The chemical nature and properties of soil contaminants health. 2021 [Електронний ресурс]. URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/fe5df8d6-6b19-4def-bdc6-62886d824574/content/src/html/chapter-02-2.html> (дата звернення: 26.01.2025).

Hennekens S.M. Turboveg for Windows: A database management system for vegetation data. User's guide. Wageningen : Alterra, 2009.

Mohiuddin K.M., Liu Z., Yang W., Zheng H., Wang F. Soil pollution indices and health risk assessment of metal(loid)s in industrial areas. *Scientific Reports, Nature*. 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59450-4>.

References

Hudkov, I.M., Kashparov, V.O., & Pareniuk, O.Yu. (2019). Radioekolohichniy monitorynh: navchalnyi posibnyk [Radioecological monitoring: textbook]. Kyiv [in Ukrainian].

Ivashchenko, T.H., & Pushkarova, I.D. (2014). Vyznachennia zabrudniuiuchykh rehovyn hruntiv terytorii promyslovykh pidpriemstv ta identyfikatsiia yikh ekolohichnoi nebezpeky [Determination

of pollutants in soils of industrial enterprises' territories and identification of their environmental hazard]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii* [Bulletin of Poltava State Agrarian Academy], (4), 102–105 [in Ukrainian].

Kabinet Ministriv Ukrainy (2021). Pro zatverdzhennia normatyviv hrychno dopustymykh kontsentratsii nebezpechnykh rechovyn u hruntakh, a takozh pereliku takykh rechovyn: postanova vid 15 hrudnia 2021 r. № 1325 [On approval of the standards for maximum permissible concentrations of hazardous substances in soils and the list of such substances: resolution № 1325 of December 15, 2021]. Ofitsiyni visnyk Ukrainy [Official Bulletin of Ukraine], (101). [Electronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1325-2021-п> (access date 03.03.2025) [in Ukrainian].

Kroik, H.A. (2011). Toksykologichni aspekty nakopychennia ta rozpodilu vazhkykh metaliv u hruntakh promyslovykh ahlomeratsii [Toxicological aspects of the accumulation and distribution of heavy metals in soils of industrial agglomerations]. In *Bioriznomanittia ta rol tvaryn v ekosystemakh: Materialy VI Mizhnarodnoi naukovoï konferentsii* [Biodiversity and the role of animals in ecosystems: Proceedings of the VI International Scientific Conference]. Dnipro: Vydavnytstvo DNU. pp. 15–18 [in Ukrainian].

Kuzenko, A.A., Diudukh, Ya.P., Onyshchenko, V.A., & Sheffer, Ya. (Eds.). (2018). Natsionalnyi katalog biotopiv Ukrainy [National catalog of biotopes of Ukraine]. Kyiv: FOP Klymenko Yu.Ya. 442 p. [in Ukrainian].

Soloviova, A., & Khomiak, I.V. (2021). Povedinkovi stratehii invaziinykh vydiv roslyn [Behavioral strategies of invasive plant species]. *Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsia zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh "Stalyi rozvytok krainy v ramkakh Yevropeiskoi intehratsii"* [Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Higher Education Students and Young Scientists "Sustainable Development of the Country within the Framework of European Integration"]. Zhytomyr: ZhDTU [in Ukrainian].

Tararai, A.M., & Khomiak, I.V. (2019). Invaziina flora fitotsenoziv klasu Artemisietea vulgaris Lonm. Rrsa et R. TX. 1950 mista Zhytomyr [Invasive flora of phytocenoses of the class Artemisietea vulgaris Lonm. Rrsa et R. TX. 1950 in Zhytomyr city]. *Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsia zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh "Stalyi rozvytok krainy v ramkakh Yevropeiskoi intehratsii"* [Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Higher Education Students and Young Scientists "Sustainable Development of the Country within the Framework of European Integration"]. Zhytomyr [in Ukrainian].

Khomiak, I.V., & Burlaka, V.A. (2005). Kharakterystyky ekosystem Slovechansko-Ovrutskoho kriazhu, yak obiektiv i kormovoi bazy bdzhilnytstva [Characteristics of the ecosystems of the Slovechansko-Ovruch Ridge as objects and a forage base for beekeeping]. *Visnyk DAU* [Bulletin of DAU], 2, 23–252 [in Ukrainian].

Khomiak, I.V. (2018). Vplyv invazii vydiv-transformeriv na dynamiku roslynnosti perelohiv Ukrainiskoho Polissia [Influence of invasions of transformer species on the dynamics of vegetation in fallows of Ukrainian Polissia]. *Bioresursy i pryrodokorystuvannia* [Bioresources and Nature Management], 10 (1–2), 29–35 [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].

Khomiak, I.V., & Khomiak, O.I. (2024). Potentsial spontannoho terraforminhu landshaftiv sukhodolu z pozytsii suchasnoi teorii dynamiky ekosystem [Potential for spontaneous terraforming of terrestrial landscapes from the perspective of modern ecosystem dynamics theory]. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychych nauk* [Ukrainian Journal of Natural Sciences], 8, 289–299. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.30> [in Ukrainian].

European Environment Agency (2021). Soil pollution and health. [Electronic resource] URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/zero-pollution/health/soil-pollution> (access date 26.01.2025) [in English].

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). The chemical nature and properties of soil contaminants. [Electronic resource] URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/fe5df8d6-6b19-4def-bdc6-62886d824574/content/src/html/chapter-02-2.html> (access date 26.01.2025) [in English].

Hennekens, S.M. (2009). TURBOVEG for Windows: A database management system for vegetation data. User's guide. Wageningen : Alterra [in English].

Mohiuddin, K.M., Liu, Z., Yang, W., Zheng, H., & Wang, F. (2024). Soil pollution indices and health risk assessment of metal(loid)s in industrial areas. *Scientific Reports, Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59450-4> [in English].

Отримано: 25.04.2025

Прийнято: 15.05.2025



УДК 581.9:574:630(477.82/.86)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.31>

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ АСОЦІАЦІЇ *DICRANO-PINETUM* НА ТЕРИТОРІЇ ЖИТОМИРСЬКОГО ПОЛІССЯ

О. М. Василенко¹, І. В. Хом'як², В. І. Тіт³

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю прогнозування змін лісових екосистем Полісся в умовах зростання антропогенного впливу та глобальних кліматичних змін. Одним із важливих складників лісових екосистем регіону є асоціація *Dicrano-Pinetum*, яка представлена переважно сосновими лісами з характерним мохово-лишайниковим покривом. Вивчення динаміки цієї асоціації під впливом комплексу екологічних чинників є важливим науковим завданням, результати якого дозволяють оцінити вплив змін навколишнього середовища на структуру та функціонування екосистем, що є основою для ухвалення рішень з управління природними ресурсами. Мета роботи полягає у проведенні аналізу фітоценотичного розмаїття та прогнозуванні динаміки асоціації *Dicrano-Pinetum* на території Житомирського Полісся в умовах кліматичних змін і антропогенного впливу.

Для досягнення поставленої мети було застосовано комплекс методів: маршрутно-експедиційний метод геоботанічних досліджень, синфітоіндикаційний аналіз (за шкалою Дідуха – Плюти), кластерний аналіз із використанням програмних засобів “Turboveg” та “Juice”, математичні методи прогнозування на основі марковських ланцюгів і програмний комплекс “Simargl”. Було проведено аналіз екологічних чинників, як-от вологість ґрунтів, термальний режим, рівень континентальності клімату й антропогенне навантаження.

Результати дослідження свідчать про високу біологічну різноманітність асоціації *Dicrano-Pinetum* із типовим домінуванням сосни звичайної та мохів (*Dicranum polysetum*, *Polytrichum commune*). Виявлено, що склад асоціації суттєво залежить від термального режиму, вологості й антропогенного навантаження. Розроблено три основні сценарії можливих змін асоціації в майбутньому: збереження структурної стабільності, трансформація до змішаних лісів за умов підвищення

¹ кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: Vasylenko-O@zu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-3283-6980

² кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: Khomiak-I@zu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-0080-0019

³ студентка кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: titvictoria92@gmail.com
ORCID: 0009-0000-9140-8500

вологості та температури, деградація мохового покриву в умовах підвищеної континентальності клімату.

Наукова новизна роботи полягає в інтегрованому використанні сучасних методологічних підходів до прогнозування суцесійних змін асоціації *Dicrano-Pinetum* із застосуванням марковського моделювання та синфітоіндикаційного аналізу.

Практична значущість полягає в можливості використання отриманих результатів для розроблення ефективних природоохоронних стратегій і раціонального управління лісовими екосистемами Полісся.

Ключові слова: суцесійне прогнозування, моховий покрив, синфітоіндикація, антропогенний вплив, кліматичні зміни, охорона природи.

MODELING THE DYNAMICS OF THE DICRANO-PINETUM ASSOCIATION IN THE TERRITORY OF ZHYTOMYR POLISSYA

O. M. Vasylenko, I. V. Khomyak, V. I. Tit

The relevance of the study is due to the need to predict changes in forest ecosystems of Polissya in conditions of increasing anthropogenic impact and global climate change. One of the important components of the forest ecosystems of the region is the Dicrano-Pinetum association, which is represented mainly by pine forests with a characteristic moss-lichen cover. Studying the dynamics of this association under the influence of a complex of ecological factors is an important scientific task, the results of which allow us to assess the impact of environmental changes on the structure and functioning of ecosystems, which is the basis for making decisions on natural resource management. The purpose of the work is to analyze phytocenotic diversity and predict the dynamics of the Dicrano-Pinetum association in the territory of Zhytomyr Polissya in conditions of climate change and anthropogenic impact.

To achieve the set goal, a set of methods was applied: route-expedition method of geobotanical research, synphytoindication analysis (according to the Didukh-Plyuta scale), cluster analysis using Turboveg and Juice software tools, mathematical forecasting methods based on Markov chains and the Simargl software package. An analysis of environmental factors, such as soil moisture, thermal regime, level of climate continentality and anthropogenic load was conducted.

*The results of the study indicate a high biological diversity of the Dicrano-Pinetum association with a typical dominance of Scots pine and mosses (*Dicranum polysetum*, *Polytrichum commune*). It was found that the composition of the association significantly depends on the thermal regime, humidity and anthropogenic load. Three main scenarios of possible changes in the association in the future were developed: preservation of structural stability, transformation to mixed forests under conditions of increased humidity and temperature, degradation of moss cover under conditions of increased climate continentality.*

The scientific novelty of the work lies in the integrated use of modern methodological approaches to predicting successional changes in the Dicrano-Pinetum association using Markov modeling and synphytoindication analysis.

The practical significance lies in the possibility of using the obtained results to develop effective environmental protection strategies and rational management of forest ecosystems of Polissya.

Key words: successional forecasting, moss cover, synphytoindication, anthropogenic impact, climate change, nature conservation.

Вступ

Лісові екосистеми Полісся є важливими природними комплексами, які відіграють ключову роль у підтриманні екологічної рівноваги регіону. Однією з панівних фітоценотичних одиниць цього регіону є асоціація *Dicrano-Pinetum*, що представлена сосновими лісами на бідних, піщаних і супіщаних ґрунтах із характерним мохово-лишайниковим покривом. Динаміка цієї асоціації під впливом природних і антропогенних чинників є складним процесом, який впливає на

біорозмаїття, стійкість екосистеми, її здатність до самовідновлення.

Одним з актуальних питань сучасної екології є моделювання змін у лісових фітоценозах для прогнозування наслідків антропогенного втручання та зміни клімату. З огляду на глобальні екологічні виклики, як-от підвищення середньорічних температур, збільшення частоти лісових пожеж, зміни в режимі зволоження та рівні ґрунтових вод, необхідним є детальне дослідження тенденцій динаміки *Dicrano-Pinetum*. Це

дозволить не лише розуміти механізми сукцесійних змін, але й розробити науково обґрунтовані заходи збереження і адаптації лісових екосистем Полісся.

Також особливого значення набуває проблема деградації лісів у зв'язку зі збільшенням антропогенного навантаження, зокрема через вирубування, рекреаційний вплив, промислові забруднення та зміну лісокористування. Моделювання динаміки асоціації *Dicrano-Pinetum* дозволить оцінити стійкість її структурних компонентів, визначити ключові чинники, що спричиняють трансформацію екосистеми, та передбачити потенційні сценарії її розвитку.

Дослідження асоціації *Dicrano-Pinetum* також важливе для розроблення природоохоронних стратегій, адже ця екосистема відіграє вагомую роль у підтримці біологічного розмаїття Полісся, слугує середовищем існування для численних видів флори і фауни. Деякі представники мохово-лишайникового покриву, зокрема лишайники роду *Cladonia*, є чутливими біоіндикаторами змін у навколишньому середовищі, що робить їх цінним інструментом для екологічного моніторингу.

Отже, актуальність цього дослідження зумовлена необхідністю прогнозування змін у соснових лісах Полісся, збереження їхньої стійкості в умовах змін клімату й антропогенного впливу, а також розвитком науково обґрунтованих підходів до управління цими екосистемами. Використання математичних і комп'ютерних моделей у вивченні динаміки лісових угруповань дозволить отримати точніші прогнози щодо їхнього майбутнього стану та сприятиме ефективній природоохоронній діяльності.

Аналіз сучасних літературних джерел показує, що питання динаміки та моделювання лісових угруповань на території Полісся є актуальним і широко обговорюваним у науковій спільноті.

Останніми роками суттєву увагу приділено вивченню природних і антропогенних чинників, що впливають на динаміку рослинних асоціацій (Хом'як та ін., 2020). Дослідники підкреслюють необхідність застосування інтегрованих синфітоіндикаційних показників для оцінювання ступеня антропогенної трансформації, які дозволяють комплексно оцінити зміну рослинних угруповань (Хом'як та ін., 2020).

Одним із напрямів, які активно розвиваються в сучасних дослідженнях, є оцінювання впливу зарегулювання гідрологічного режиму на екосистеми малих річок,

які тісно взаємодіють із сосновими лісами типу *Dicrano-Pinetum* (Хом'як та ін., 2021a). Установлено, що порушення природного режиму течії істотно впливає на структуру рослинності й біорозмаїття долини річки Лісної, призводять до трансформації рослинних угруповань і порушення природного стану екосистем.

Значну увагу приділяють також методологічним підходам до моделювання рослинних сукцесій (Хом'як та ін., 2021b). Зокрема, дослідження на території піщаних кар'єрів Житомирського Полісся свідчать про високу ефективність моделювання та прогнозування динаміки рослинності із застосуванням комплексного підходу до визначення структурних і динамічних параметрів екосистем (Хом'як та ін., 2021a).

Окрім цього, з огляду на регіональний аспект, суттєву цінність має узагальнене дослідження природних умов і тенденцій змін екосистем Полісся. Серед іншого, важливим є врахування специфіки антропогенних перетворень, що відбуваються в регіоні останні десятиліття (Українське Полісся, 2022). Сучасні публікації акцентують на необхідності охорони екологічно чутливих зон і окремих природних комплексів, як-от витoki малих річок, що забезпечують збереження унікальних типів рослинності, зокрема й *Dicrano-Pinetum* (Хом'як та ін., 2022).

На міжнародному рівні активно вивчаються питання впливу чинників середовища на динаміку соснових лісів (Bartkowiak et al., 2016; Sienkiewicz et al., 2021). У дослідженні історії соснових угруповань, проведеному в Північній Польщі, доведено значення палеоекологічних чинників для формування сучасної структури соснових лісів (Sienkiewicz et al., 2021). Це дозволяє застосовувати ці дані як важливий компонент для моделювання сучасних змін аналогічних угруповань на території українського Полісся.

Також вагомими є праці, присвячені детальному опису та класифікації рослинних асоціацій, їхньому місцю в загальноєвропейській системі фітоценозів (Chytrý et al., 2020). Ці дослідження значно полегшують процес моделювання, надають стандартизовані методичні підходи до вивчення та класифікації рослинності, зокрема соснових лісів типу *Dicrano-Pinetum*.

Отже, сучасні дослідження формують надійне методологічне підґрунтя для моделювання динаміки рослинних асоціацій,

зокрема *Dicrano-Pinetum*, з урахуванням як регіональних умов, так і глобальних екологічних викликів. Подальші дослідження сприятимуть уточненню моделей, що є необхідним для раціонального управління лісовими екосистемами Полісся та збереження їхнього біорозмаїття та стійкості в умовах сучасних змін довкілля.

Незважаючи на значні досягнення у вивченні динаміки рослинних асоціацій на території Полісся, низка питань залишається не досить дослідженою. Зокрема, актуальними є питання впливу змін клімату й антропогенного навантаження на структуру та стабільність цього угруповання, а також оцінювання його сукцесійних змін у довгостроковій перспективі. Не досить вивченими залишаються гідрологічні чинники, зокрема зміни рівня ґрунтових вод, які можуть суттєво впливати на розвиток досліджуваної асоціації. Важливим напрямом подальших досліджень є проведення аналізу мікоризних взаємозв'язків, що визначають стійкість екосистеми, та застосування методів дистанційного зондування для оцінювання її стану та прогнозування можливих змін. Окрім того, відсутність адаптивних моделей реагування асоціації *Dicrano-Pinetum* на екстремальні погодні явища та зміни клімату ускладнює прогнозування її майбутнього розвитку. Не досить вивченими залишаються біоценотичні зв'язки між рослинними угрупованнями та популяціями тварин, які можуть впливати на процеси природного поновлення лісів. Також відсутні комплексні природоохоронні заходи, що враховували б сучасні виклики та ризики для збереження цього фітоценозу. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розроблення інтегрованих моделей прогнозування змін екосистеми, упровадження дистанційного моніторингу та розроблення адаптивних природоохоронних стратегій, що дозволить ефективно управляти лісовими ресурсами Полісся та забезпечити збереження біорозмаїття регіону.

Мета дослідження – проведення аналізу фітоценотичного розмаїття та моделювання динаміки розвитку асоціації *Dicrano-Pinetum* на території Житомирського Полісся в умовах кліматичних змін і антропогенного впливу.

Для досягнення мети дослідження було поставлено такі завдання: здійснити довгостроковий комплексний моніторинг сукцесійних змін асоціації *Dicrano-Pinetum* на території Житомирського Полісся, що

передбачає регулярні геоботанічні описи з визначенням змін флористичного складу та частоти зустрічальності домінантних і співдомінантних видів (*Pinus sylvestris*, *Dicranum polysetum*, *Polytrichum commune* та інші) в умовах зміни кліматичних показників (термальний режим, вологість ґрунту та континентальність клімату) і посилення антропогенного навантаження. У межах дослідження застосувати синфітоіндикаційний аналіз за шкалами Дідуха – Плюти та Дідуха – Хом'яка з метою оцінювання стану екологічних чинників і ступеня антропогенної трансформації рослинних угруповань, а також виконати прогнозування розвитку асоціації *Dicrano-Pinetum* із використанням математичних моделей на основі марковських ланцюгів і програмного комплексу “Simargl”, що дозволить визначити ймовірні сценарії динаміки структури фітоценозу в умовах різних кліматичних ситуацій.

Матеріал і методи

Матеріалами дослідження є геоботанічні описи, зроблені загальноприйнятим маршрутно-експедиційним методом (Westhoff, Maarel, 1973), доповнені застосуванням класифікаційних одиниць, визначених у Національному каталозі біотопів України (Національний..., 2018). Використання цього каталогу дозволило здійснити чітке типологічне розмежування досліджуваних біотопів, а також забезпечити стандартизацію опису природних оселищ згідно з національними та європейськими підходами до класифікації середовищ існування. Дослідження здійснено на території Житомирського Полісся у 2024 р. Геоботанічний опис охоплював характеристики умов середовища та проєктивне покриття вищих судинних рослин за модифікованою шкалою Ж. Браун-Бланке (Braun-Blanquet, 1965). Для синфітоіндикаційного аналізу класичну семибальну шкалу було перетворено на п'ятибальну, де покриття понад 75% відповідало 5 балам, 50–75% – 4 балам, 25–50% – 3 балам, 5–25% – 2 балам, а менше ніж 5% – 1 балу. Категорії «+» та «r» у модифікованій шкалі отримали значення «1 бал» (Дідух, 2012).

Дослідження передбачало рекогносцирувальні обстеження, фітоценотичний аналіз і оцінювання основних чинників середовища (Khomiak et al., 2020). Закладення пробних площ розміром 25 × 25 та 50 × 50 м дозволило детально дослідити структуру рослинного покриву. Координати встановлювали за допомогою GPS-навігації або мобільного застосунку “GPSTest” (Hennekens &

Schaminée, 2009). Фітоіндикаційний аналіз застосовувався для визначення таких параметрів, як вологість, кислотність ґрунту, освітленість і зміни сукцесійних процесів. Спостереження за динамікою рослинного покриву сприяло визначенню особливостей його розвитку в часі (Дубина та ін., 2019).

Камеральний етап дослідження передбачав обробку й аналіз польових даних за допомогою спеціалізованих програмних засобів. Для систематизації геоботанічних описів використовувалася база даних “Turboveg”, а кластерний аналіз фітоценозів проводився за допомогою програмного забезпечення “Juice” (Hennekens & Schaminée, 2009). Групування описів у кластери здійснювалося методом TWINSpan на основі їхньої правильності в синтаксономічній таблиці (Дідух, Плюта, 1994).

Для прогнозування розвитку асоціації *Dicrano-Pinetum* застосовувалося сукцесійне моделювання на основі марковських ланцюгів, що дозволяло прогнозувати зміни у структурі фітоценозів (Khomiak et al., 2020). Екосистемне моделювання проводилося з використанням програмного пакету “Simargl” (Хом’як і Хом’як, 2014), що дозволяло оцінити стабільність асоціації в умовах різних екологічних сценаріїв. Синфітоіндикаційний аналіз проводився на основі оцінювання середовищних показників відповідно до шкали Дідуха – Плюти, а рівень антропогенної трансформації

визначався за шкалою Дідуха – Хом’яка (Дідух і Хом’як, 2015). Динамічні зміни екосистеми та вплив кліматичних чинників оцінювалися за допомогою математичних методів аналізу.

Результати

Опис результатів дослідження фітоценотичного розмаїття лісів Житомирського Полісся свідчить про високу видову різноманітність із домінуванням соснових угруповань. Основу фітоценозу формує асоціація *Dicrano-Pinetum* Preising et Knapp ex Oberdorfer 1957, яка є типовою для бореальних лісів. Вона характеризується переважанням *Pinus sylvestris* L. у деревному ярусі, мохів *Dicranum polysetum* Swartz та *Polytrichum commune* Hedw. у ґрунтовому покриві, а також злакових і вересових видів у трав’яному ярусі.

Аналіз флористичного складу засвідчив значне поширення таких видів: *Dicranum polysetum* Swartz (72,7%), *Pinus sylvestris* L. (69,7%), *Festuca ovina* L. (66,7%), *Melampyrum pratense* L. (63,6%), *Sorbus aucuparia* L. (54,5%). Вони формують стійке ядро угруповання, забезпечують його екологічну стабільність. Інші види, як-от *Frangula alnus* Mill., *Calluna vulgaris* (L.) Hull та *Vaccinium myrtillus* L., трапляються рідше, проте виконують важливу роль у процесах регенерації лісу (рис. 1).

Це підтверджує природність бореальних лісів і домінування хвойних порід із харак-

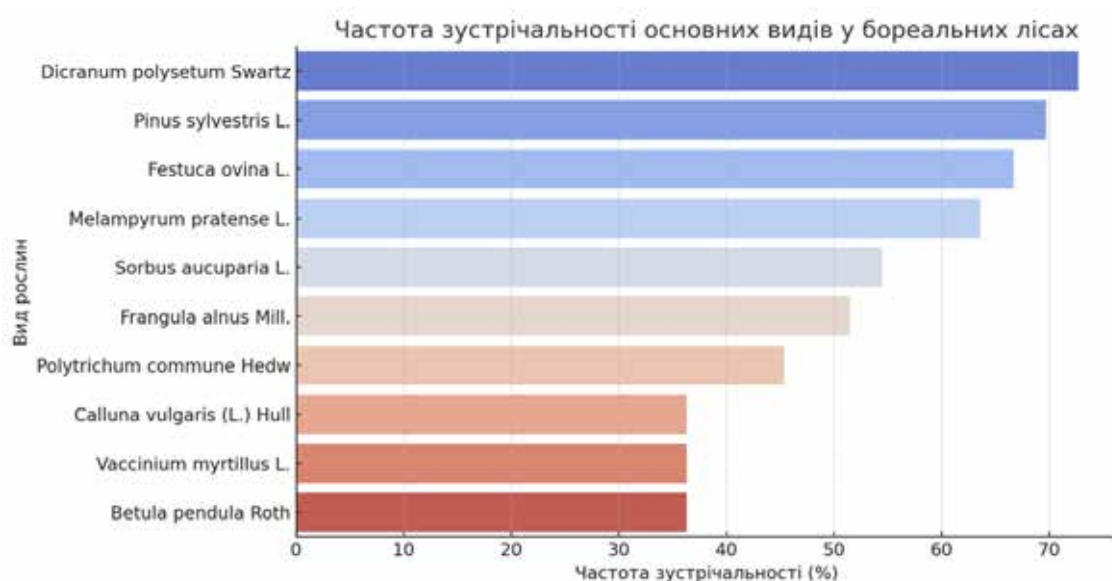


Рис. 1. Частота зустрічальності основних видів у бореальних лісах Житомирського Полісся (%)

терним моховим покривом. Висока частота зустрічальності *Festuca ovina* L. (66,7%) свідчить про значний розвиток трав'янистого покриву, що є характерною рисою цього типу лісів.

Дослідження також виявило варіативність фітоценотичного складу на різних ділянках (рис. 2). Кількість видів на досліджених ділянках змінюється від 8 до 30, що вказує на екологічну неоднорідність середовища.

Спостерігається тенденція до зменшення розмаїття на ділянках з меншою вологістю та підвищеним антропогенним впливом. Найбільше видове багатство (24 види) зафіксовано на другій ділянці, тоді як у найбільшій екосистемі кількість видів не перевищує 14.

Аналіз таксономічного складу досліджуваних лісів свідчить про їхню належність до класів *Pyrolo-Pinetea*, *Quercetea roboreticae* та *Vaccinio-Piceetea*. Це підтверджує наявність як бореальних, так і перехідних хвойно-дубових угруповань. У межах цих класів виділено 4 порядки, 5 союзів і 17 асоціацій, серед яких найпоширенішими є *Dicrano-Pinetum* і *Quercus roboris-Pinetum*.

На основі отриманих результатів і сучасних підходів до екосистемного моделювання було проведено прогноз розвитку асоціації *Dicrano-Pinetum* із використанням сукцесійного моделювання на основі марковських ланцюгів. Цей підхід дозволяє оцінити ймовірні зміни у структурі фітоценозу залежно від динаміки середовищних показників (Khomiak et al., 2020).

Для прогнозування використовувався програмний пакет "Simargl", що дозволив змоделювати можливі сценарії розвитку асоціації *Dicrano-Pinetum* за різних екологічних умов. Основна увага приділялася стабільності асоціації в умовах кліматичних змін, підвищення середньорічної температури та можливих змін у режимі вологості ґрунту.

Результати моделювання свідчать, що за сценарію помірних кліматичних змін асоціація зберігатиме свою структурну стабільність, хоча можливе поступове збільшення участі листяних видів унаслідок підвищення температури та вологості. За сценарію інтенсивних кліматичних змін прогнозується зменшення частки мохів (*Dicranum polysetum*, *Polytrichum commune*) та зростання представленості *Betula pendula* та *Quercus robur*, що може свідчити про перехід до стадії дубово-соснових лісів.

Для оцінювання екологічної стійкості асоціації проведено синфітоіндикаційний аналіз за шкалою Дідуха – Плюти. Аналіз виявив, що серед основних чинників середовища найбільший вплив на зміну складу угруповання мають багаторічний режим зволоження, загальний сольовий режим (табл. 1–2).

Динамічні зміни екосистеми оцінювалися за допомогою математичних методів аналізу. Використання моделювання дозволило спрогнозувати три основні вектори розвитку асоціації *Dicrano-Pinetum*.

Збереження стабільності – у разі незначних змін показників чинників (рис. 3–4) та контролю антропогенного навантаження

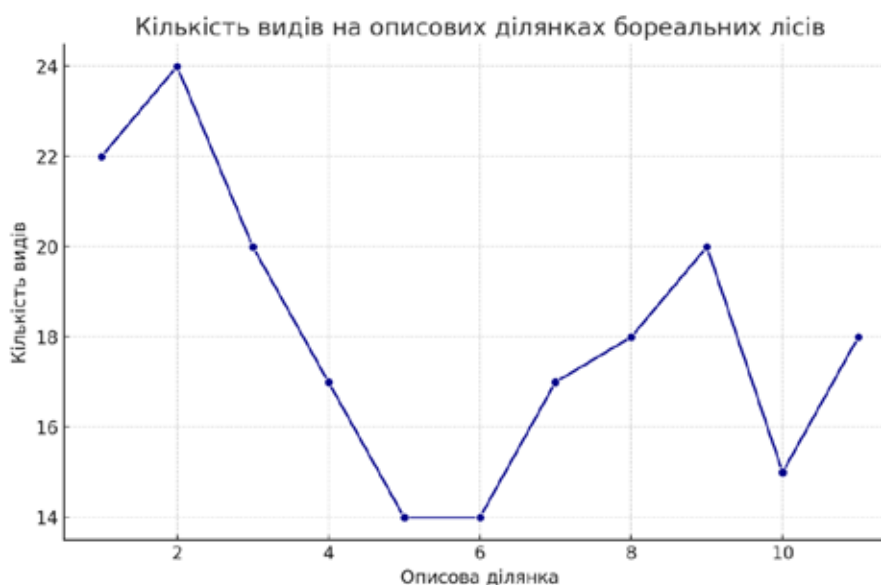


Рис. 2. Фітоценотичний склад на описових ділянках

Таблиця 1

Синфітоіндикаційні показники едафічних факторів

Статистичні показники	HD	FH	RC	SL	CA	NT	AE
середнє	11,65	5,95	5,96	5,63	5,78	4,45	6,17
максимум	12,63	7,19	7,31	7,45	6,75	5,62	7,03
мінімум	10,07	4,90	5,00	4,64	5,00	3,71	5,42
амплітуда	2,56	2,29	2,31	2,81	1,75	1,91	1,61

Таблиця 2

Синфітоіндикаційні показники мікрокліматичних факторів, природної динаміки й антропогенної трансформації

Статистичні показники	TM	OM	KN	CR	LC	ST	HE
середнє	7,77	13,79	8,69	7,78	6,68	11,28	6,53
максимум	8,73	15,00	9,22	8,36	7,66	14,83	9,45
мінімум	7,21	11,78	8,13	7,31	6,06	5,11	4,31
амплітуда	1,52	3,22	1,09	1,05	1,60	9,72	5,14

структура асоціації залишиться майже незмінною (рис. 5).

Перехід до змішаних лісів – із наростанням температури та вологості очікується збільшення листяних видів (*Quercus robur*, *Betula pendula*), що може привести до формування дубово-соснових угруповань.

Деградація мохового покриву – за умови збільшення сухих періодів прогнозується зменшення покриву мохів і поширення злакових видів (*Festuca ovina*, *Agrostis tenuis*), що може вказувати на початкові стадії деградації угруповання.

Обговорення

Результати дослідження фітоценотичного розмаїття бореальних лісів Житомирського Полісся дозволили оцінити структурні та функціональні особливості асоціації *Dicrano-Pinetum*, визначити основні тенденції її розвитку та спрогнозувати можливі сценарії змін у майбутньому. Отримані дані підтверджують стабільність угруповання, хоча спостерігаються окремі ознаки його трансформації під впливом змінних екологічних чинників.

Аналіз фітоценозу показав, що домінантними видами у складі асоціації є *Pinus*

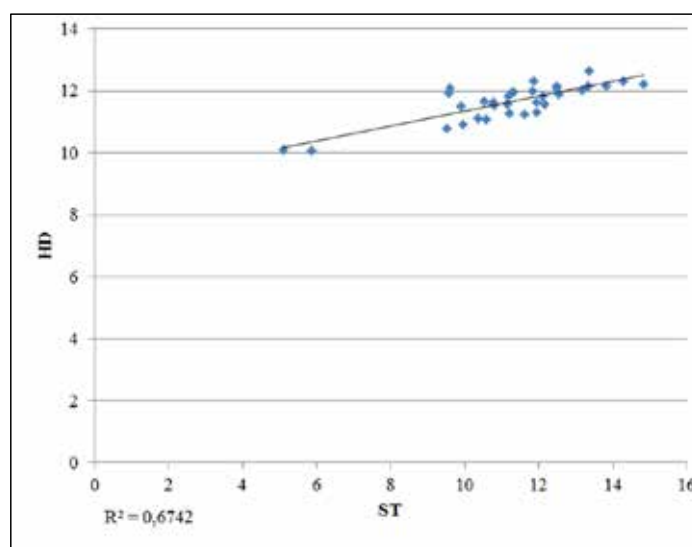


Рис. 3. Співвідношення між показником природної динаміки (ST) та багаторічним режимом динаміки (HD)

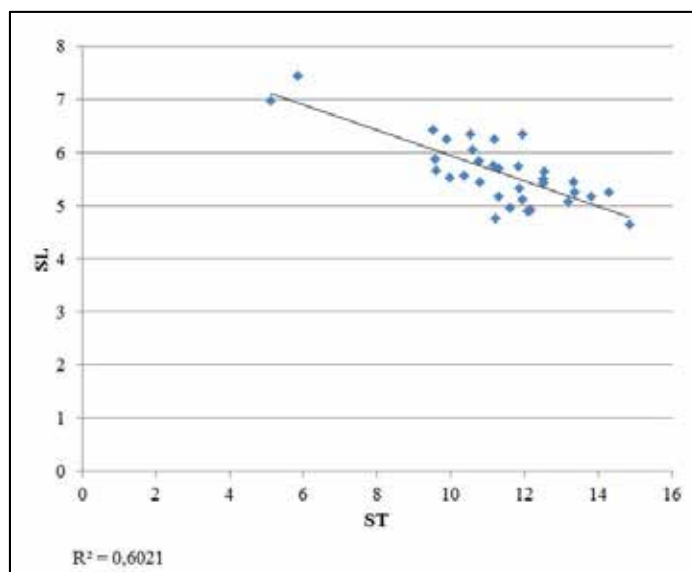


Рис. 4. Співвідношення між показником природної динаміки (ST) та загальним сольовим режимом (SL)

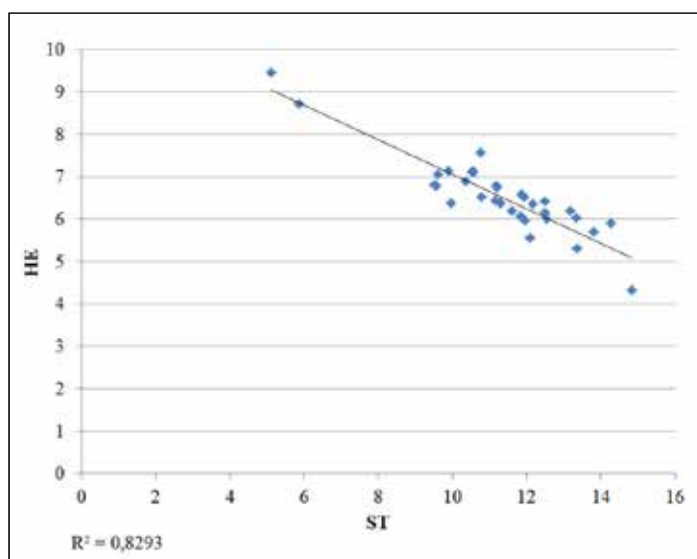


Рис. 5. Співвідношення між показниками природної динаміки (ST) і антропогенної трансформації (HE)

sylvestris L., *Dicranum polysetum* Swartz, *Festuca ovina* L., *Melampyrum pratense* L. і *Sorbus aucuparia* L. Висока частота зустрічальності мохів (*Dicranum polysetum* – 72,7%, *Polytrichum commune* – 45,4%) підтверджує, що досліджуване угруповання характеризується стабільним ґрунтово-рослинним покривом, який сприяє збереженню вологості та підтриманню специфічного мікроклімату лісу. Водночас підвищення участі листяних порід (*Betula pendula*, *Quercus robur*) свідчить про посту-

пові зміни у структурі фітоценозу, що можуть бути наслідком впливу кліматичних і антропогенних чинників.

Кількість видів на окремих дослідницьких ділянках виявила значну варіативність – від 8 до 30 видів, що зумовлено як особливостями ґрунтового покриву, так і рівнем освітленості та вологозабезпеченості. Максимальна видова розмаїтість (24–30 видів) спостерігається в більш зволжених і затінених місцевостях, тоді як найменша (8–14 видів) – у сухих піщаних біотопах, що підтверджує

роль вологості в підтриманні екологічної стабільності асоціації.

Застосування екосистемного моделювання дозволило визначити можливі вектори розвитку асоціації *Dicrano-Pinetum*. Марковське моделювання показало, що за збереження поточних кліматичних умов асоціація залишатиметься стабільною, але зі збільшенням температури та вологості можливе наростання частки листяних видів (*Quercus robur*, *Betula pendula*), що може привести до формування змішаних сосново-дубових угруповань. Найбільший ризик для стабільності асоціації несе сценарій підвищеної континентальності клімату, за якого прогнозується деградація мохового покриву та поширення злакових видів (*Festuca ovina*, *Agrostis tenuis*).

Результати синфітоіндикаційного аналізу за шкалою Дідуха – Плюти (Дідух, Плюта, 1994) підтвердили залежність угруповання від термального режиму, вологості та рівня антропогенного навантаження. Помірний рівень антропогенної трансформації свідчить про відносну стійкість лісових екосистем, однак подальше збільшення рекреаційного навантаження або вирубка можуть стати каталізаторами змін у структурі фітоценозу.

Висновки

Фітоценотична структура асоціації *Dicrano-Pinetum* характеризується стабільністю та типовим складом домінантних видів. У деревному ярусі переважає *Pinus sylvestris* L., у моховому покриві – *Dicranum polysetum* Swartz, а у трав'янистому ярусі значну роль відіграють представники родів *Festuca*, *Melampyrum* і *Sorbus*. Аналіз частоти зустрічальності видів підтвердив значний рівень біорозмаїття, що є характерним для бореальних лісів.

Фітоценоз демонструє просторову варіативність, що проявляється у зміні кількості видів залежно від умов зволоженості, освітленості та рівня антропогенного впливу. Найбільша видова розмаїтість зафіксована в більш зволжених і затінених місцевостях, тоді як у сухих піщаних біотопах її рівень суттєво знижується. Синфітоіндикаційний

аналіз виявив, що основними екологічними чинниками, які визначають стан асоціації, є термальний режим, рівень вологості й антропогенне навантаження. Помірний рівень антропогенної трансформації свідчить про відносну збереженість природних угруповань, однак подальше посилення антропогенного тиску може призвести до їхньої деградації та зміни структурної організації.

Екосистемне моделювання дозволило визначити ймовірні сценарії динаміки асоціації *Dicrano-Pinetum*. За умов помірних кліматичних змін структура угруповання залишається відносно стабільною. У разі підвищення температури та вологості прогнозується поступове збільшення участі листяних видів, що може сприяти формуванню змішаних сосново-дубових лісів. Водночас поширення континентальності клімату та зниження рівня ґрунтової вологи може спричинити деградацію мохового покриву та розширення злакових компонентів, що свідчить про потенційні зміни у структурі фітоценозу.

Подальші дослідження асоціації *Dicrano-Pinetum* мають бути спрямовані на оцінювання довгострокових тенденцій змін у структурі фітоценозів під впливом природних і антропогенних чинників. Важливим завданням є використання сучасних методів дистанційного зондування та геоінформаційних технологій для картографування змін у розподілі рослинних угруповань. Перспективним напрямом є застосування розширеного математичного моделювання з використанням алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування динаміки біогеоценозів. Актуальними залишаються дослідження механізмів природного відновлення асоціації після антропогенних порушень, як-от вирубка чи пожежі, а також оцінювання впливу глобальних кліматичних змін на екосистемні функції бореальних лісів. Комплексний підхід до дослідження цих питань сприятиме ефективному збереженню екологічної стабільності бореальних лісів Полісся та розробленню природоохоронних заходів, спрямованих на мінімізацію негативного впливу зовнішніх чинників.

Список використаної літератури

- Дідух Я.П. Екофлористичний аналіз рослинного покриву України: методологія та методи дослідження. Київ : Наукова думка, 2012. 284 с.
- Дідух Я.П., Плюта П.Г. Синфітоіндикаційний аналіз рослинних угруповань. Київ : Наукова думка, 1994. 192 с.
- Дідух Я.П., Хом'як І.В. Оцінка еколого-флористичних особливостей рослинного покриву: методологія та методи дослідження (на прикладі Українського Полісся). Київ : Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України, 2015. 64 с.

Дубина Д.В., Соломаха В.А., Шеляг-Сосонко Ю.Р. Продромус рослинності України. Київ : Фітосоціоцентр, 2019. 456 с.

Національний каталог біотопів України / за ред. А.А. Куземко та ін. Київ : ФОП Ю.Я. Клименко, 2018. 442 с.

Українське Полісся: проблеми та тренди сучасного розвитку. Луцьк : АНТУ, 2022. 310 с. [Електронний ресурс]. URL: https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2022-02/Збірник_Полісся.pdf (дата звернення: 13.03.2025).

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). С. 136–141 [Електронний ресурс]. URL: <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2020/5/21.pdf> (дата звернення: 13.03.2025).

Хом'як І.В., Гарбар Д.А., Андрійчук Т.В., Костюк В.С., Власенко Р.П. Динаміка відновлюваної рослинності піщаних кар'єрів Житомирського Полісся. *Екологічні науки*. 2021а. № 6 (39). С. 204–207. URL: <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2021/6/20.pdf> (дата звернення: 13.03.2025).

Хом'як І.В., Гарбар Д.А., Василенко О.М., Андрійчук Т.В. Сучасні тенденції змін методологічних підходів до вивчення відновлення природної рослинності на постгірничих територіях. *Українське Полісся: проблеми та тренди сучасного розвитку*. Ніжин : НДУ ім. Гоголя, 2022. С. 10–12.

Хом'як І.В., Зарічна М.С., Демчук Н.С., Костюк В.С., Василенко О.М., Власенко Р.П., Гарбар Д.А. Вплив зарегулювання течії на динаміку екосистем долини річки Лісна (Житомирська область). *Екологічні науки*. 2021b. № 2 (35). С. 45–48 [Електронний ресурс]. URL: <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2021/2/9.pdf> (дата звернення: 13.03.2025).

Хом'як І.В., Хом'як Д.І. Нова програма екосистемологічного моніторингу "Simargl". *Сучасні проблеми екології та геотехнологій*. Житомир : Вид-во ЖДТУ, 2012. С. 76.

Bartkowiak S., Prusinkiewicz Z., Wawrzyniak J. Growth dynamics of the Scots pine (*Pinus sylvestris*) in Poland. *Forest Research Papers*. 2016. Vol. 77. Issue 3. P. 209–217. <https://doi.org/10.1515/frp-2016-0024>.

Braun-Blanquet J. *Plant Sociology the Study of Plant Communities*. Springer-Verlag, 1965. 865 p.

Chytrý M., Danihelka J., Kaplan Z., Pyšek P., Tichý L., Danihelka P. European Vegetation Classification A working guide for the European Vegetation Archive. *Applied Vegetation Science*. 2020. Vol. 23. Issue 3. P. 648–675. <https://doi.org/10.1111/avsc.12519>.

Hennekens S.M., Schaminée J.H.J. Turboveg, a comprehensive data base management system for vegetation data. *Journal of Vegetation Science*. 2001. Vol. 12. P. 589–591.

Sienkiewicz J., Kołaczek P., Wacnik A., Głos M., Granoszewski W., Nalepka D., Tylmann W. Holocene history of *Pinus sylvestris* in northern Poland in the light of integrated palaeoecological data. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 2021. Vol. 296. P. 104537. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2021.104537>.

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

Diudukh, Ya.P. (2012). *Ekoflorystychnyy analiz roslynnoho pokryvu Ukrainy: metodolohiia ta metody doslidzhennia* [Ecofloristic analysis of plant cover of Ukraine: Methodology and research methods]. Kyiv : Naukova Dumka. 284 p. [in Ukrainian].

Diudukh, Ya.P., & Pliuta, P.H. (1994). *Syntfitoindykatsiyni analiz roslynnykh uhrupovan* [Synphytocoenotic analysis of plant communities]. Kyiv : Naukova Dumka. 192 p. [in Ukrainian].

Diudukh, Ya.P., & Khomiak, I.V. (2015). *Otsinka ekoloho-florystychnykh osoblyvosti roslynnoho pokryvu: metodolohiia ta metody doslidzhennia (na prykladi Ukrainiskoho Polissia)* [Assessment of ecological-floristic features of plant cover: Methodology and research methods (case study of Ukrainian Polissia)]. Kyiv : Instytut botaniky im. M.H. Kholodnoho NAN Ukrainy. 64 p. [in Ukrainian].

Dubyna, D.V., Solomakha, V.A., & Sheliag-Sosonko, Yu.R. (2019). *Prodromus roslynnosti Ukrainy* [Prodromus of vegetation of Ukraine]. Kyiv : Fitosotsiotsentr. 456 p. [in Ukrainian].

Kuzenko, A.A., Diudukh, Ya.P., Onyshchenko, V.A., & Sheffer, Ya. (Eds.). (2018). *Natsionalnyi katalog biotopiv Ukrainy* [National catalog of biotopes of Ukraine]. Kyiv : FOP Klymenko Yu. Ya. 442 p. [in Ukrainian].

Ukrainske Polissia: problemy ta trendy suchasnoho rozvytku [Ukrainian Polissia: Problems and trends of modern development] (2022). Luts'k: LNTU. 310 p. [Electronic resource] URL: https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2022-02/Zbirnyk_Polissia.pdf (access date 13.03.2025) [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.Yu. (2020). Metodolohichni pidkhody do stvorennia intehrovanooho syntfitoindykatsiinoho pokaznyka antropohennoi transformatsii [Methodological approaches to creating an integrated synphytocoenotic indicator of anthropogenic transformation]. *Ekolohichni nauky [Ecological Sciences]*, 5 (32), 136–141. [Electronic resource] URL: <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2020/5/21.pdf> (access date 13.03.2025) [in Ukrainian].

Khomiak, I.V., Harbar, D.A., Andriichuk, T.V., Kostiuk, V.S., & Vlasenko, R.P. (2021a). Dynamika vidnovliuvanoi roslynnosti pishchanykh kar'ieriv Zhytomyrskoho Polissia [Dynamics of restored vegetation in sand quarries of Zhytomyr Polissia]. *Ekolohichni nauky [Ecological Sciences]*, 6 (39), 204–207. [Electronic resource] URL: <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2021/6/20.pdf> (access date 13.03.2025) [in Ukrainian].

Khomiak, I.V., Zarichna, M.S., Demchuk, N.S., Kostiuk, V.S., Vasylenko, O.M., Vlasenko, R.P., & Harbar, D.A. (2021b). Vplyv zarehuliuвання techii na dynamiku ekosystem dolyny richky Lisna (Zhytomyrska oblast) [Impact of flow regulation on ecosystem dynamics in the Lisna River valley (Zhytomyr region)]. *Ekolohichni nauky [Ecological Sciences]*, 2 (35), 45–48. [Electronic resource] URL: <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2021/2/9.pdf> (access date 13.03.2025) [in Ukrainian].

Khomiak, I.V., & Khomiak, D.I. (2012). Nova prohrama ekosystemolohichnoho monitorynhu “Simargl” [New program of ecosystem monitoring “Simargl”]. In *Suchasni problemy ekolohii ta heotekhnolohii* [Modern problems of ecology and geotechnologies], p. 76. Zhytomyr : ZhDTU [in Ukrainian].

Khomiak, I.V., Harbar, D.A., Vasylenko, O.M., & Andriichuk, T.V. (2022). Suchasni tendentsii zmin metodolohichnykh pidkhodiv do vyvchennia vidnovlennia pryrodnoi roslynnosti na posthirnychykh terytoriiakh [Current trends in methodological approaches to studying natural vegetation restoration in post-mining areas]. In *Ukrainske Polissia: problemy ta trendy suchasnoho rozvytku* [Ukrainian Polissia: Problems and trends of modern development], 10–12. Nizhyn : NDU im. Hoholia [in Ukrainian].

Bartkowiak, S., Prusinkiewicz, Z., & Wawrzyniak, J. (2016). Growth dynamics of the Scots pine (*Pinus sylvestris*) in Poland. *Forest Research Papers*, 77 (3), 209–217. <https://doi.org/10.1515/frp-2016-0024> [in English].

Braun-Blanquet, J. (1965). *Plant sociology: The study of plant communities*. Springer-Verlag. 865 p. [in English].

Chytrý, M., Danihelka, J., Kaplan, Z., Pyšek, P., Tichý, L., & Danihelka, P. (2020). European vegetation classification: A working guide for the European Vegetation Archive. *Applied Vegetation Science*, 23 (3), 648–675. <https://doi.org/10.1111/avsc.12519> [in English].

Hennekens, S.M., & Schaminée, J.H.J. (2001). TURBOVEG, a comprehensive data base management system for vegetation data. *Journal of Vegetation Science*, 12, 589–591 [in English].

Sienkiewicz, J., Kołaczek, P., Wacnik, A., Głos, M., Granoszewski, W., Nalepka, D., & Tylmann, W. (2021). Holocene history of *Pinus sylvestris* in northern Poland in the light of integrated palaeoecological data. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 296, 104537. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2021.104537> [in English].

Westhoff, V., & van der Maarel, E. (1973). The Braun-Blanquet approach. In R. H. Whittaker (Ed.), *Handbook of vegetation science: Part V – Ordination and classification of vegetation*, 619–726 [in English].

Отримано: 24.04.2025

Прийнято: 15.05.2025



УДК 581.9

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.32>

ОЦІНКА ПЕРСПЕКТИВ ПОШИРЕННЯ *OPUNTIA HUMIFUSA* RAF., 1820 У ЄВРОПІ В УМОВАХ ГЛОБАЛЬНИХ ЗМІН КЛІМАТУ

О. В. Гарбар¹, С. В. Жеревко², Л. І. Ворончук³, Д. А. Гарбар⁴

Вид родини *Cactaceae* – *Opuntia humifusa* (Raf.) Raf., 1820 належить до групи кактусів американського походження, що охороняються в нативному ареалі, але поширилися у багатьох районах земної кулі та характеризуються вираженою тенденцією до здичавіння. Останніми роками спостерігається поширення цього виду й у континентальній частині України. Для прогнозування можливостей подальшого поширення цього виду на основі відкритих даних нами проведено моделювання сучасної біокліматичної ніші *O. humifusa* та встановлено межі толерантності виду до основних біокліматичних параметрів середовища. Водночас найбільш значущими параметрами, які визначають можливість поширення виду, виявились кількість опадів, сезонність сонячної радіації, найнижча щотижнева радіація, радіація найвологішого кварталу, середня температура найхолоднішого кварталу, мінімальна температура найхолоднішого місяця. Отримана модель характеризується високою надійністю ($AUC = 0,996$), а її омісія досить добре збігається з передбаченою динамікою омісії, розрахованою для тестових даних, отриманих із самого розподілу *Maxent*. Модель потенційного сучасного ареалу *O. humifusa* доводить, що кліматичні умови лише частини території України (південна) придатні для існування цього виду. Оптимальні кліматичні умови для виду виявляються лише в кількох локальних зонах. Моделювання майбутньої динаміки ареалу виду під впливом кліматичних змін свідчить про його суттєве розширення та зміщення в північному напрямку найближчим часом. Основні зміни відзначаються у площях і просторовій

¹ доктор біологічних наук,
професор кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: o.v.harbar@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4357-4525

² учениця
(Черняхівський ліцей № 1, м. Житомир)
e-mail: sofiazherevko08@gmail.com
ORCID: 0009-0004-7256-1744

³ учитель-методист біології та екології
(Черняхівський ліцей № 1, м. Житомир)
e-mail: lyubovvoronchuk26@gmail.com
ORCID: 0009-0009-6868-1846

⁴ кандидат біологічних наук,
доцент кафедри зоології, біологічного моніторингу та охорони природи
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: garbar.diana78@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5739-3114

конфігурації зон із різною придатністю для існування виду. Оптимальна зона практично зникає в моделі 2080 року. Середньопридатні та придатні кліматичні області суттєво розширюються в моделях до 2080 року та зміщуються в північні регіони Європи.

Ключові слова: *O. humifusa*, біокліматичне моделювання, ареал, глобальні зміни клімату, Maxent.

ASSESSMENT OF *OPUNTIA HUMIFUSA* RAF., 1820 DISTRIBUTION PROSPECTS IN EUROPE UNDER GLOBAL CLIMATE CHANGE

O. V. Harbar, S. V. Zharevko, L. I. Voronchuk, D. A. Harbar

Species of the family Cactaceae – Opuntia humifusa (Raf.) Raf., 1820 belongs to a group of cacti of American origin that are protected in their native area but have spread to many regions of the globe and exhibit a pronounced tendency towards naturalization. In recent years, the expansion of this species has also been observed in the continental part of Ukraine. To predict the potential for further spread of this species, we conducted modeling of the current bioclimatic niche of O. humifusa based on open-access data and established the species' tolerance limits to key bioclimatic environmental parameters. The most significant parameters determining the potential distribution of the species were precipitation, solar radiation seasonality, lowest weekly radiation, radiation of the wettest quarter, mean temperature of the coldest quarter, and minimum temperature of the coldest month. The obtained model demonstrates high reliability (AUC = 0,996), and its omission rate aligns well with the predicted omission dynamics calculated for test data derived from the Maxent distribution itself. The model of the potential current area of O. humifusa indicates that only a part of Ukraine's territory (the southern part) falls within climatic conditions suitable for the species' existence. Optimal climatic conditions for the species are found only in a few localized zones. Modeling the future dynamics of the species' area under the influence of climate change suggests its significant expansion and northward shift in the near future. The primary changes are observed in the areas and spatial configuration of zones with varying suitability for the species' existence. The optimal zone practically disappears in the 2080 model. Moderately suitable and suitable climatic regions significantly expand in the models up to 2080 and shift towards the northern regions of Europe.

Key words: *O. humifusa*, bioclimatic modeling, distribution range, global climate change, Maxent.

Вступ

Проблема біологічних інвазій є однією з найактуальніших у сучасному світі. Дослідження та розуміння процесів інвазії та натуралізації допомагає прогнозувати їхній розвиток і управляти наслідками. Це особливо важливо для ефективного використання природних ресурсів у контексті глобальних кліматичних змін (Sipango et al., 2022).

Opuntia humifusa (Raf.) Raf., 1820 – представник родини Cactaceae, відомий також як східна опунція. Вона належить до групи кактусів американського походження, що охороняються в нативному ареалі, але поширились у багатьох районах земної кулі та характеризуються вираженою тенденцією до здичавіння. Комітет зі статусу дикої природи Канади (COSEWIC) вважає цей вид таким, що перебуває під загрозою зникнення (White, 2000). Її занесено до списку видів, що потребують охорони (Klinkenberg & Rhodes, 1980), що вказує на високий рівень загрози. Нині ця рослина поширена лише у двох місцях в Канаді, хоча історичні

дані свідчать про її нещодавню присутність і в інших регіонах Онтаріо (Reznicek, 1982).

Відомо, що *O. humifusa* добре витримує екстремально холодний клімат (Gorelik et al., 2015). Однак високий рівень затінення є шкідливим для неї. Установлено, що для виживання *O. humifusa* необхідно щонайменше 30% освітлення (Dresner, 2017), а на ділянках із проєктивним покриттям рослинності понад 50% рослина взагалі не трапляється (Abella & Jaeger, 2004). Очевидно, що з перебігом сукцесії рівень освітленості знижується, що погіршує умови існування *O. humifusa* (Van Der Wal et al., 2007).

Природні популяції *O. humifusa* в Канаді обмежені в основному заповідними територіями. Ці рослини ростуть у національному парку Пойнт-Пелі та Провінційному природному заповіднику Фіш-Пойнт. Інтродукована популяція виявлена у провінційному парку Рондо (Wildlife ..., 2024). Більша частина придатного середовища для відновлення популяції *O. humifusa* також розташована в національному парку Пойнт-Пелі й у природному заповіднику Фіш-Пойнт. Відомі

популяції цього виду передусім стикаються із загрозою втрати середовища існування через сукцесійні процеси й ерозію берегової лінії. Тому стохастичні події можуть швидко знищити популяцію. Порушення природного середовища і транспортна діяльність уздовж узбережжя озера Ері сприяли втраті придатних для існування *O. humifusa* біотопів на піщаних косах. Антропогенний тиск, пов'язаний із походами та спостереженнями за птахами, також є потенційною загрозою для цього виду, оскільки ці дії можуть призводити до ненавмисного витоптування рослин (Parks ..., 2024). З метою збереження виду на території Канади рекомендується ширше використовувати його в ландшафтній архітектурі та садівництві в Онтаріо.

В Україну цей вид було завезено під час Кримської війни (1854–1855 рр.) з метою озеленення поховань солдатів англо-французького десанту, загиблих під час атаки на Севастополь. У другій половині XIX ст. цей вид був зібраний в околицях Севастополя і включений до колекції Нікітського ботанічного саду, а також інтродукований у різних локаціях Великої Ялти на південному березі Криму. У другій половині XX ст. *O. humifusa* цілком натуралізувалася на Кримському півострові, наприкінці XX – на початку XXI ст. рослина неодноразово зафіксована у природних екосистемах Південного та Західного узбережжя Криму (Yena, 2012).

Наприкінці першого десятиліття XXI ст. *O. humifusa* вийшла за межі Криму і почала розповсюджуватися у Степовій зоні материкової України (Rasevich et al., 2021). Натепер в Україні зафіксовано більше десяти локалітетів цього виду, зокрема, у Миколаївській, Херсонській, Донецькій, Дніпропетровській, Черкаській і Київській областях, де зазвичай популяції представлені здичавілими культиварами. Вони зростають в антропогенно трансформованих біотопах – на узбіччях доріг, стежках дачних масивів, у приватному секторі міст і на стихійних смітниках (міста Миколаїв, Кривий Ріг, Сміла) (Rasevich et al., 2021). Також цей вид виявляється на місцях поховань домашніх тварин, зокрема й на території Національного природного парку «Кам'янська Січ», де популяція була знищена співробітниками парку через загрозу біорозмаїттю об'єкта природно-заповідного фонду (Moysiyyenko et al., 2021).

З огляду на тенденцію поширення *O. humifusa* територією України та натуралізацію її у природних фітоценозах, метою

цього дослідження є моделювання ареалу *O. humifusa* з використанням географічних інформаційних систем (далі – ГІС), установлення меж витривалості виду щодо ключових біокліматичних чинників, прогнозування просторово-часових змін його ареалу в умовах глобальних змін клімату на основі наявних моделей цього процесу.

Матеріал і методи

Дані про розповсюдження *O. humifusa* були отримані із Глобальної інформаційної системи з біорізноманіття (GBIF.org, 16 червня 2024 р.). Поширення цього виду в Україні було уточнено на основі останніх опублікованих даних. Усього визначено 4 690 пунктів реєстрації, зокрема 3 370 точок реєстрації в нативному ареалі на східному узбережжі Північної Америки та 1 050 пунктів у центральній Європі, де вид є адвентивним. Географічні координати цих точок визначені в системі координат WGS84 та відображені на карті (рис. 1).

Створення моделі ареалу (екологічної ніші) виду проведено з використанням стандартних 19 біокліматичних змінних (Bio 01 – Bio 19) (табл. 1).

Для вдосконалення моделі використано також середньомісячні дані про інтенсивність сонячної радіації (12 змінних) (1970–2000 рр.), а також цифрову модель рельєфу з бази даних World Clim (<https://www.worldclim.org>).

Для моделювання динаміки ареалу *O. humifusa* в умовах глобальних змін клімату була використана модель MIROC6 у поєднанні з песимістичним сценарієм емісії парникових газів SSP5 8.5 (Hausfather, 2024). Оскільки дані для клімату майбутнього з роздільною здатністю 30" натепер недоступні (як і дані щодо інтенсивності сонячної радіації), як предиктори використано 19 біокліматичних змінних (Bio 01 – Bio 19) (див. табл. 1) для періоду 2061–2080 рр. із роздільною здатністю 2,5' із бази даних World Clim v. 2.1 (<https://www.worldclim.org>). Цей період вибрано, оскільки, згідно з використаним сценарієм CMIP6 емісії CO₂, на його кінець прогнозується максимальний рівень емісії парникових газів.

Для визначення продуктивності моделі аналізували значення площі під кривою (AUC – area under the curve) з робочих характеристик моделі (ROC – receiver operating characteristics). Отримане значення AUC можна інтерпретувати як передбачувану ймовірність випадкового вибору комірки сітки у правильно скоригованій моделі. AUC



Рис. 1. Сучасне поширення *O. humifusa*

Таблиця 1
Біокліматичні показники, використані для
моделювання

№ змінної	Змінна
Bio 01	Середньорічна температура
Bio 02	Середній місячний температурний діапазон
Bio 03	Ізотермічність
Bio 04	Температурна сезонність
Bio 05	Максимальна температура найтеплішого місяця
Bio 06	Мінімальна температура найхолоднішого місяця
Bio 07	Річний температурний діапазон
Bio 08	Середня температура наймокрішого кварталу
Bio 09	Середня температура найсухішого кварталу
Bio 10	Середня температура найтеплішого кварталу
Bio 11	Середня температура найхолоднішого кварталу
Bio 12	Середньорічна кількість опадів
Bio 13	Опади наймокрішого місяця
Bio 14	Опади найсухішого місяця
Bio 15	Сезонність опадів
Bio 16	Опади найвологішого кварталу
Bio 17	Опади найсухішого кварталу
Bio 18	Опади найтеплішого кварталу
Bio 19	Опади найхолоднішого кварталу

визначає успіх моделі з усіма можливими порогами. Якщо $AUC > 0,5$, це означає, що модель працює краще, ніж випадкова оцінка. Що ближче значення тесту AUC до 1, то чутливіша й точніша модель.

Для інтерпретації значення AUC застосовують такі порогові категорії: $AUC \geq 0,9$ – високий, $0,9 > AUC \geq 0,8$ – задовільний, $AUC < 0,8$ – незадовільний. Щоб визначити зону розподілу потенційного ареалу було встановлено такі порогові значення: $<0,1$ – непридатні території, $0,1-0,3$ – малоприсади, $0,3-0,5$ – середньоприсади, $0,5-0,7$ – присади, $0,7-0,9$ – високоприсади, $>0,9$ – найкращі території. Статистичний аналіз отриманих даних здійснили за допомогою програмного пакету “STATISTICA 6.0”.

Результати та обговорення

Для моделювання сучасного ареалу *O. humifusa* використано 119 геореферованих точок. На основі аналізу кліматичних даних у цих точках розраховано статистичні показники біокліматичної ніші виду.

Нами вибрано 25% відсотків випадкових тестових даних (“random test percentage”), які використано програмою для тестування моделі. Це дозволяє зробити статистичний аналіз точності. Для аналізу використовується поріг для бінаризації передбачення, умови вважаються придатними, якщо передбачення вище порога, і непридатними, якщо нижче. Графік на рис. 2. показує, як

змінюється омісія і передбачена територія за тестовими та тренувальними точками залежно від кумулятивного порога.

Як видно із графіка, омісія за тестовими точками досить добре збігається з передбаченою динамікою омісії, розрахованою для тестових даних, отриманих із розподілу Махент. Передбачена омісія є прямою лінією з визначення кумулятивного формату.

Наступний графік (рис. 3) показує receiver operating curve (ROC) для тренувальних і тестових даних. Червона крива показує, наскільки добре модель описує тренувальні дані ("fit"). Синя лінія показує, наскільки добре модель описує тестові дані та є реальним тестом передбачувальної здатності моделі. У нас ці криві практично збігаються. Чорна лінія показує ситуацію, на яку можна було б очікувати, якби надійність прогнозів моделі була на випадковому рівні. Що ближче до верхнього лівого кута синя лінія, то краще модель передбачає знахідки, що містяться в тестовій вибірці. Оскільки в нас є тільки дані про знахідки, але немає даних про відсутність, замість помилки омісії (частка відсутніх, передбачена як трапляння) використовується "frac-

tional predicted area" (частка від площі території дослідження, на якій вид трапляється).

У таблиці 2 наведено оцінки внеску окремих змінних для побудови моделі (змінні із внеском, близьким до нуля, не наводяться). У процесі тренування моделі Махент відстежується, які змінні середовища роблять внесок у побудову моделі. Кожен крок алгоритму Махент збільшує приріст моделі, змінюючи коефіцієнт для однієї з функцій градієнта середовища. Наприкінці процесу тренування відбувається перерахунок приростів у відсотки, які наведено у другій колонці таблиці (див. табл. 2). Ці відсоткові внески визначаються тільки евристично й залежать від конкретного шляху, яким пішов код Махент, щоб досягти оптимального рішення.

Третя колонка в таблиці 2 показує другий показник внеску змінної – важливість за пермутації (permutation importance). Цей показник залежить тільки від остаточної моделі, а не від шляху, який був пройдений програмою, щоб її отримати. Внесок кожної змінної визначається за допомогою випадкової зміни значень цієї змінної у тренувальних точках, а також вимірювання

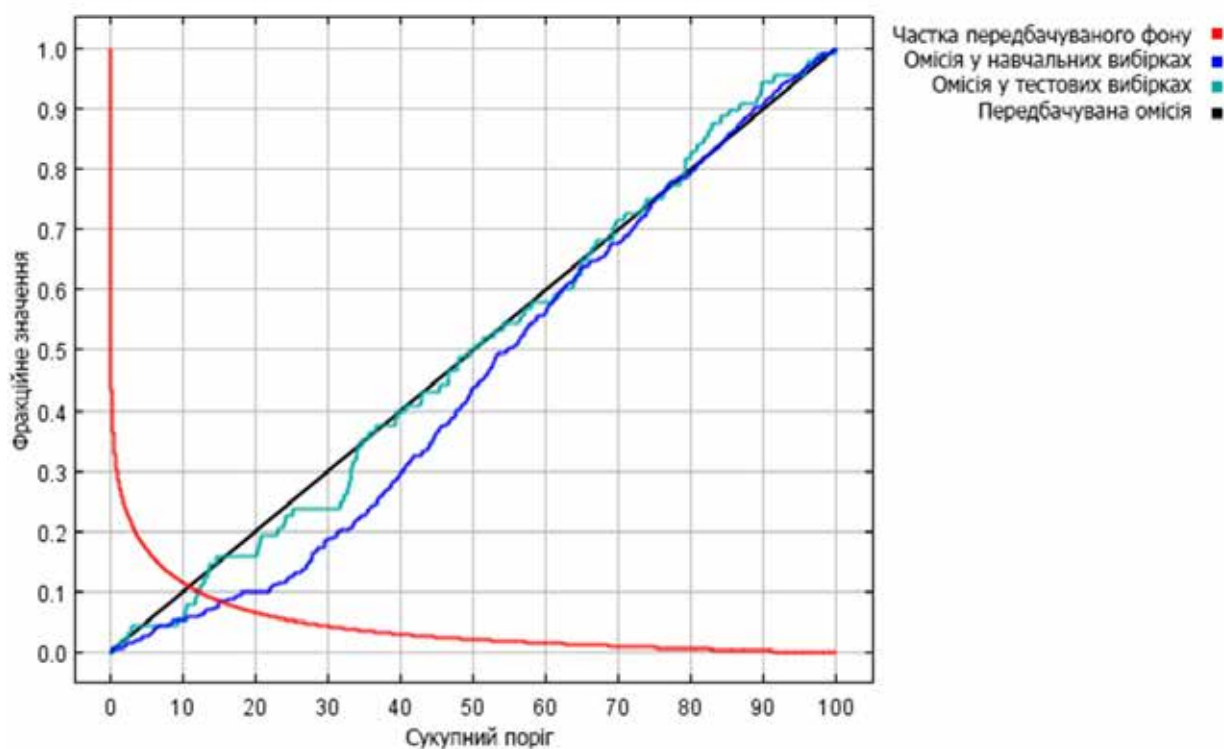


Рис. 2. Зміни омісії і передбаченої території моделі за тестовими та тренувальними точкам залежно від кумулятивного порога

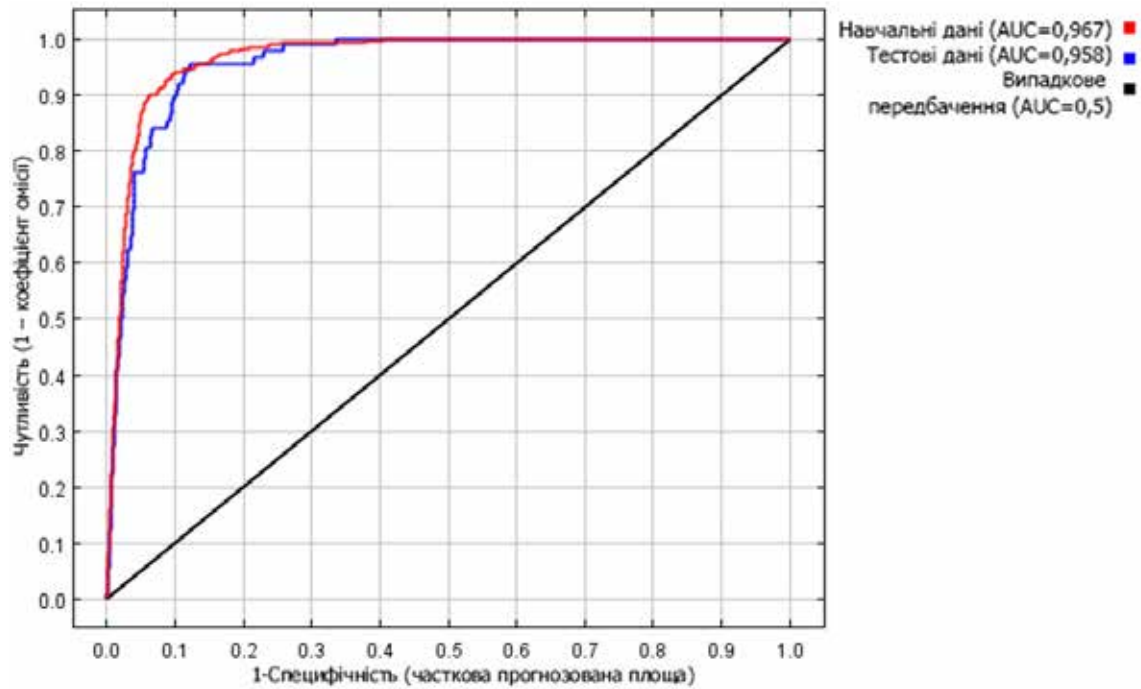


Рис. 3. Чутливість та специфічність моделі ареалу *O. humifusa*

Таблиця 2
Змінні, які роблять найбільший внесок (%) у побудову моделі

Змінна	Відсотковий внесок	Важливість для пермутації
S _{rad} _12	30,1	1,1
Bio 11	18,7	10,7
Bio 17	10,7	0
S _{rad} _09	10,2	13,1
Bio 07	7,2	1,5
Bio 19	3	0
S _{rad} _10	2,9	15,8
Bio 18	2,6	4,4
Elevation	2,3	1
S _{rad} _07	2,2	0
Bio 14	1,6	0,7
S _{rad} _06	1,5	5,6
Bio_04	1,4	4,6
S _{rad} _01	1,2	37,1
Bio 03	1,1	0,9
Bio 06	1,1	0,3

зменшення тренувальної AUC. У результаті проведеного аналізу відібрано дев'ять змінних (табл. 3), які роблять найбільший внесок у побудову моделі. Саме ці змінні використано для побудови наступних моделей.

Модель потенційного сучасного ареалу *O. humifusa* (рис. 4) доводить, що частині території України (південна) властиві кліматичні умови, придатні для існування цього виду. Оптимальні кліматичні умови для *O. humifusa* виявляються лише в кількох локальних зонах. Потрібно також урахувати, що, окрім кліматичних параметрів, для цього виду важливим чинником є наявність придатних для існування біотопів. Щоб мати більшу уяву про біотопи даного виду, розглянемо типові біотопи Криму, де цей вид натуралізувався.

Насамперед це такі локалітети, як гори Гасфорта та Телеграфна, хребет Орта-Кая, Кадикойські висоти, гори Таврос і Аскеті. Вони розташовані на західних відрогах Головної гряди Кримських гір (на Балаклавських висотах) у гіпсометричному діапазоні від 20 до 320 м над рівнем моря на добре освітлених скельних і кам'янистих оголеннях і карбонатних варіантах коричневих ґрунтів. Як відомо, велика щільність вапняків Головної гряди, пов'язана з їхньою метаморфічністю, визначає особливості ґрунтоутворювального процесу, водного режиму та формування поверхневого стоку води (Simoglou et al., 2019). Тріщинуватість вапняків зумовлює накопичення потужної товщі кам'яно-щебеневих продуктів вивітрювання біля підніжжя скель і обривів,

Таблиця 3

Біокліматичні параметри екологічної ніші *O. humifusa* (n = 119)

Параметри	Нативний ареал		Європа		Україна (континентальна)	
	Mean	SE	Mean	SE	Mean	SE
Bio_1	16,52	0,09	11,16	0,06	9,14	0,44
Bio_2	11,40	0,03	9,50	0,03	8,83	0,20
Bio_3	39,16	0,17	35,29	0,11	26,51	0,36
Bio_4	699,84	3,75	639,58	2,15	936,61	13,25
Bio_5	31,24	0,04	26,20	0,07	26,84	0,78
Bio_6	1,15	0,13	-0,77	0,07	-6,49	0,51
Bio_7	30,09	0,10	26,97	0,05	33,33	0,57
Bio_8	21,54	0,12	12,91	0,12	19,15	0,25
Bio_9	12,23	0,15	8,45	0,23	4,19	3,06
Bio_10	24,87	0,05	19,25	0,07	20,50	0,58
Bio_11	7,68	0,13	3,67	0,07	-2,40	0,47
Bio_12	1184,70	4,07	739,22	5,36	481,14	27,76
Bio_13	147,60	0,80	90,78	0,69	59,57	5,65
Bio_14	62,47	0,37	38,92	0,40	26,86	1,40
Bio_15	29,86	0,36	25,68	0,23	24,72	2,13
Bio_16	407,34	2,21	234,80	1,89	162,29	13,66
Bio_17	212,00	1,14	132,03	1,15	92,57	3,88
Bio_18	385,08	2,31	180,03	1,61	158,57	14,38
Bio_19	238,14	1,41	159,41	1,65	109,29	6,19
Elev	128,30	5,37	430,00	8,11	61,43	17,23
Srad_1	8 904,21	43,38	4 894,49	27,72	3 734,29	150,94
Srad_2	11 700,67	39,80	7 869,57	29,57	6 358,29	143,38
Srad_3	15 329,34	39,38	12 210,73	31,65	10 023,00	131,45
Srad_4	19 084,28	37,62	16 029,29	30,13	14 432,00	223,47
Srad_5	21 348,06	30,96	19 431,24	33,75	19 398,71	185,47
Srad_6	21 644,62	14,93	21 995,92	39,42	21 662,14	298,32
Srad_7	21 690,85	17,22	22 765,70	42,62	21 355,43	342,54
Srad_8	19 657,66	17,75	19 818,63	37,51	18 763,86	396,05
Srad_9	16 276,37	21,51	14 569,56	30,87	13 280,57	382,14
Srad_10	13 026,35	34,93	9 373,84	28,68	8 182,00	292,18
Srad_11	9 698,76	44,49	5 511,92	28,37	4 128,00	224,52
Srad_12	8 099,60	41,82	4 072,17	26,36	2 978,43	156,06

які, очевидно, сприяють формуванню умов, необхідних для укорінення кладодіїв і насіннєвого відновлення *O. humifusa*.

Ценопопуляції виду в цих локалітетах охоплюють площу від кількох до семи тисяч квадратних метрів за проектного покриття опунції від 5 до 75%. На схилах гори Таврос відзначено сім різних за площею угруповань. Розміри популяцій визначаються як наявністю придатних для заселення кактусами ділянок території, так, імовірно, і дав-

ністю появи на них цього інвазійного виду.

Очевидно, що реалізована ніша цього виду буде суттєво обмежуватись тими біокліматичними чинниками, значення яких наближаються до нижньої або верхньої межі витривалості виду, що добре ілюструють графіки розподілу пунктів реєстрації виду в діапазонах дії чинників (рис. 5).

Як видно з наведених графіків, цей вид в Європі, особливо в Україні, існує в умовах, дуже близьких до точки мінімуму, здебіль-

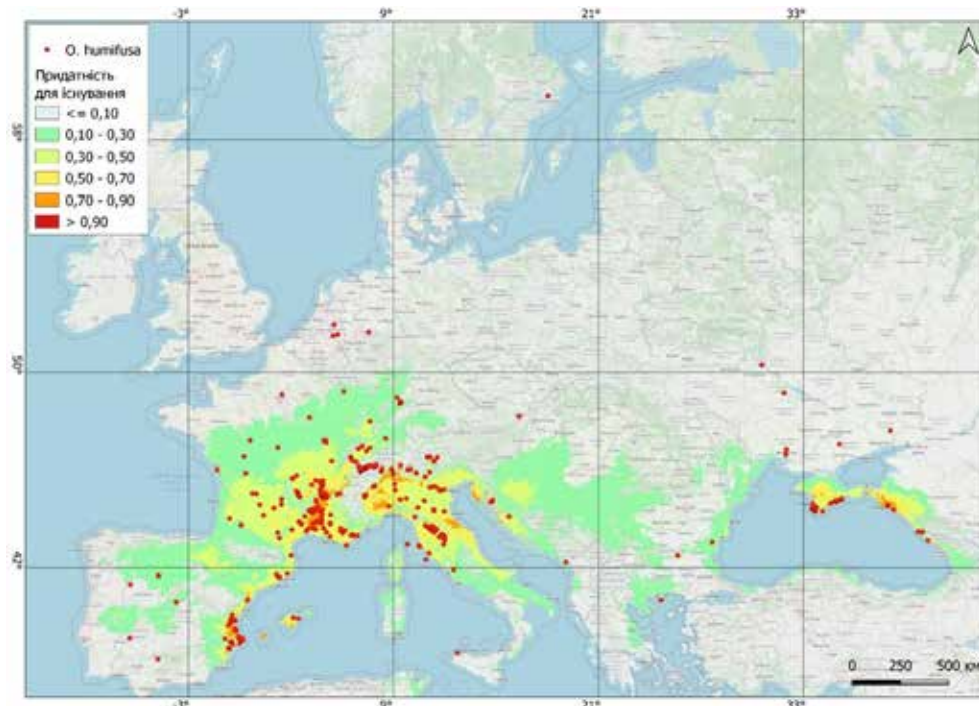


Рис. 4. Модель потенційного сучасного ареалу *O. humifusa* в Європі (32 предиктори)

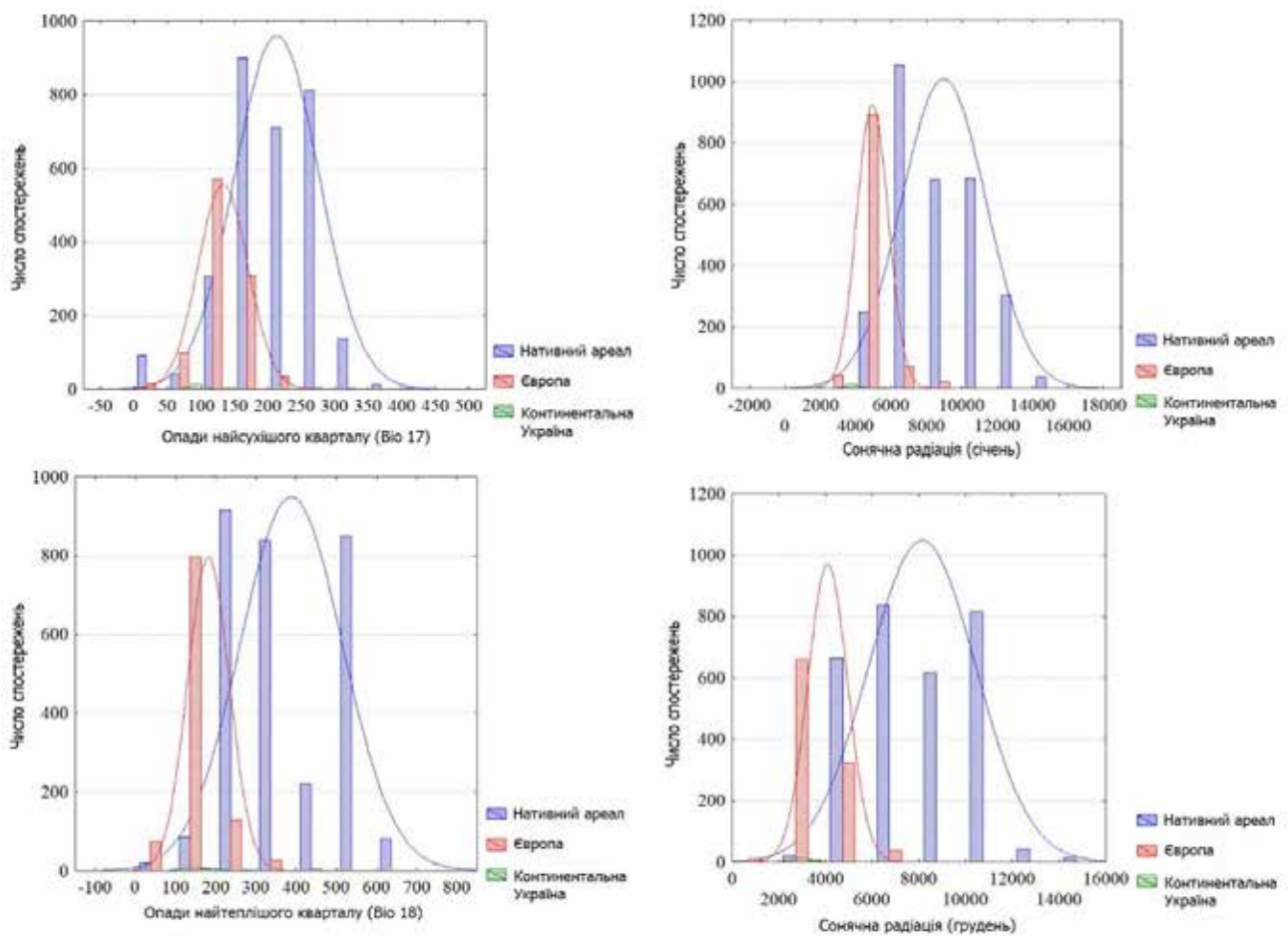


Рис. 5. Екологічна толерантність *O. humifusa* щодо основних біокліматичних чинників у різних частинах ареалу

шого далеких від оптимальних. Це означає, що на більшій частині території України вид може поширюватись суто в локальних біотопах із придатним для його існування мікрокліматом. Тому навряд чи в сучасних умовах можна очікувати на його стрімку експансію.

Моделювання майбутньої динаміки ареалу цього виду під впливом змін клімату свідчить про можливість його суттєвого розширення в північному напрямку (рис. 6).

Досить цікава динаміка спостерігається і стосовно площ із зонами з різною придатністю для існування *O. humifusa*. Так, середньопридатні та придатні кліматичні області за сучасних кліматичних умов можуть стати непридатними в майбутньому, однак північніші території стають більш придатними для існування виду, імовірно, будуть ним заселятись у найближчі десятиліття (див. рис. 6) (рис. 7).

Важливо зазначити, за розширення на північ територія не зменшуватиметься за площею, навпаки, збільшуватиметься, про що свідчать дані графіків (див. рис. 5). Вірогідно, такий тип динаміки зумовлений особливостями використаного сценарію емісії парникових газів (IPCC IV SRES Scenarios A1B) (Emissions ..., 2000).

Висновки

У результаті проведеного аналізу моделі сучасної біокліматичної ніші *Opuntia humifusa* встановлено межі толерантності виду до основних біокліматичних параметрів середовища. Найбільш значущими параметрами, які визначають можливість поширення виду, є кількість опадів, сезонність сонячної радіації, найнижча щотижнева радіація, радіація найвологішого кварталу, середня температура найхолоднішого кварталу, мінімальна температура найхолоднішого місяця. Отримана модель характеризується високою надійністю (AUC = 0,996), а її омісія досить добре збігається з передбаченою динамікою омісії, розрахованою для тестових даних, отриманих із розподілу Maxent. Модель потенційного сучасного ареалу *Opuntia humifusa* доводить, що лише частині території України (південна) властиві кліматичні умови, придатні для існування цього виду. Оптимальні кліматичні умови для виду виявляються лише в кількох локальних зонах.

Моделювання майбутньої динаміки ареалу виду під впливом кліматичних змін свідчить про його суттєве розширення та зміщення в північному напрямку. Основні зміни відзначаються у площях і просторовій

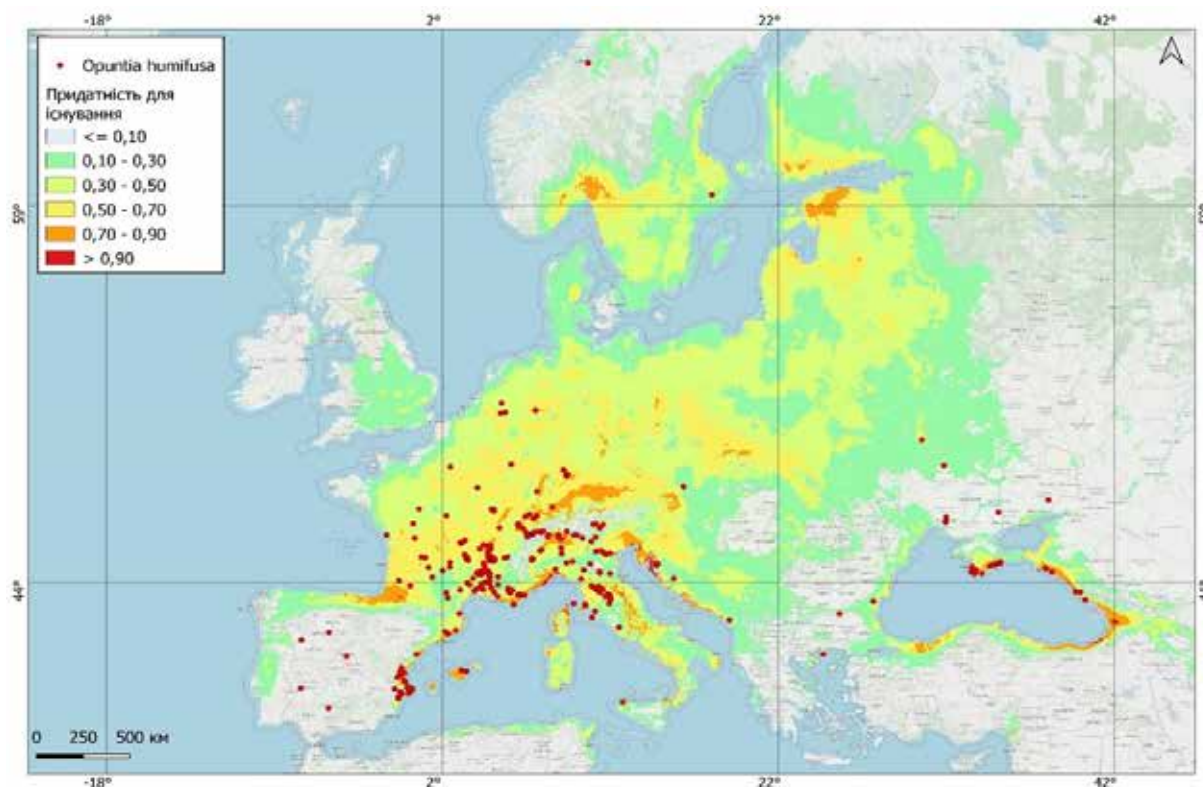


Рис. 6. Модель потенційного ареалу *O. humifusa* в Європі (32 предиктори) на 2080 р.

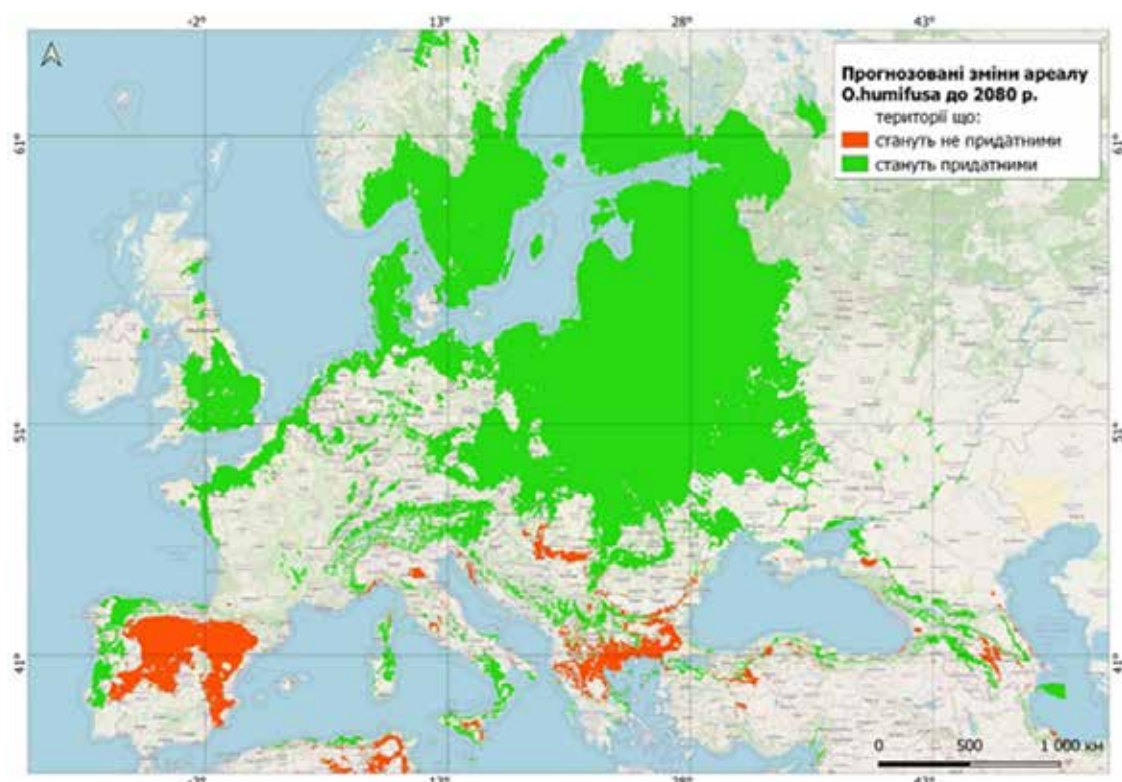


Рис. 7. Прогнозовані зміни ареалу *O. humifusa* до 2080 р.

конфігурації зон із різною придатністю для існування виду. Оптимальна зона практично зникає в моделі 2080 р. Середньопридатні

та придатні кліматичні області суттєво розширюються в моделях до 2080 р. та зміщуються в північні регіони.

Список використаної літератури

- Abella S.R., Jaeger J.F. Ecology of Eastern prickly pear cactus (*Opuntia humifusa*) in Oak Openings Preserve, northwestern Ohio. *The Michigan Botanist*. 2004. V. 43. P. 1–11.
- Dresner T.D. North and South: Morphological variability of the endangered *Opuntia cespitosa* in Canada and its change with environmental conditions. *Castanea*. 2017. V. 82. № 1. P. 8–23. <https://doi.org/10.2179/16-096>.
- Emissions Scenarios / Nebojsa Nakićenović and Rob Swart (Eds.). Cambridge University Press, UK, 2000. 570 p.
- Gorelik R., Dresner T.D., Hancock K. Frost Hardiness of Cacti (Cactaceae) in Ottawa, Ontario, Canada. *Madroño : a West American journal of botany*. 2015. V. 62. № 1. P. 33–45.
- Hausfather Z. CMIP6: The Next Generation of Climate Models Explained [Електронний ресурс]. URL: <https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained> (дата звернення: 10.10.2024).
- Klinkenberg R., Rhodes J. Long Point Provincial Park Life Sciences Register. Ontario Ministry of Natural Resources, Simcoe County. Simcoe, Ontario, 1980. 116 p.
- Moysiyenko I., Melnyk R., Neprokin A., Lozhkina O., Zakharova M. Ecological and coenotic characteristics of the primary focus of the invasion of *Opuntia humifusa* (Raf.) Raf. on the Lower Dnieper sands. *Natural Resources of Border Areas under a Changing Climate : The 5th International Scientific Conference: the program, abstracts*, Ukraine, Chernihiv, September 21–24, 2021. Chernihiv : Publishing House “Desna Polygraph”, 2021. P. 60–61.
- Parks Canada Agency Corporate Plan 2010–2011 [Електронний ресурс]. URL: <https://parks.canada.ca/docs/pc/plans/plan2010-2011/sec01> (дата звернення: 10.10.2024).
- Rasevich V.V., Didukh Ya.P., Daciuk V.V., Boiko G.V. Dispersal of *Opuntia humifusa* (Cactaceae) in the continental part of Ukraine. *Ukr. Bot. J.* 2021. V. 78. № 1. P. 62–68.

- Reznicek S.A. Review and prioritization of rare species: Point Pelee National Park : Draft report. Prepared for Parks Canada. 1982. 52 p.
- Simoglou K.B., Koutsos T.V., Tan K. Report 82. New floristic records in the Balkans: 38 / Compl. : V. Vladimirov, M. Aybeke, V. Matevski, K. Tan. *Phytologia Balcanica*. 2019. V. 19. № 1. P. 153.
- Sipango N., Khuliso R., Sebola A., Hawu O., Mabelebele M., Mokoboki H., Moyo B. Prickly Pear (*Opuntia* spp.) as an Invasive Species and a Potential Fodder Resource for Ruminant Animals. *Sustainability*. 2022. № 14. P. 3719. <https://doi.org/10.3390/su14073719>.
- Van Der Wal J., Evans N., Wozniczka I., Lovett-Doust L. Demography of *Opuntia humifusa* occurring in Point Pelee National Park. Prepared for Parks Canada Agency, Point Pelee National Park. 2007. 53 p.
- White D.J. COSEWIC assessment and update report on the status of *Opuntia humifusa* in Canada. Committee on the Status of Endangered Wildlife in Canada. Ottawa, 2000. 7 p.
- Wildlife species eligible for amendment to list: Species at Risk Act. Environment and Climate Change Canada (ECCC) [Електронний ресурс]. URL: <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/species-risk-act-accord-funding/listing-process/wildlife-species-amendment-list-schedule-1.html> (дата звернення: 10.10.2024).
- Yena A.V. Spontaneous flora of the Crimean Peninsula. Simferopol : N. Orianda, 2012. 232 p.

References

- Abella, S.R., & Jaeger, J.F. (2004). Ecology of Eastern prickly pear cactus (*Opuntia humifusa*) in Oak Openings Preserve, northwestern Ohio. *The Michigan Botanist*, 43, 1–11 [in English].
- Dresner, T.D. (2017). North and South: Morphological variability of the endangered *Opuntia cespitosa* in Canada and its change with environmental conditions. *Castanea*, 82 (1), 8–23. <https://doi.org/10.2179/16-096> [in English].
- Emissions Scenarios (2000). Cambridge University Press, UK. Nebojsa Nakićenović and Rob Swart (Eds.) [in English].
- Gorelik, R., Dresner, T.D., & Hancock, K. (2015). Frost Hardiness of Cacti (Cactaceae) in Ottawa, Ontario, Canada. *Madroño: a West American journal of botany*, 62 (1), 33–45 [in English].
- Hausfather, Z. CMIP6: The Next Generation of Climate Models Explained. [Electronic resource] URL: <https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained> (access date 10.10.2024) [in English].
- Klinkenberg, R., & Rhodes, J. (1980). Long Point Provincial Park Life Sciences Register. Ontario Ministry of Natural Resources, Simcoe County, Simcoe, Ontario [in English].
- Moysiyenko, I., Melnyk, R., Neprokin, A., Lozhkina, O., & Zakharova, M. (2021). Ecological and coenotic characteristics of the primary focus of the invasion of *Opuntia humifusa* (Raf.) Raf. on the Lower Dnieper sands. *Natural Resources of Border Areas under a Changing Climate. The 5th International Scientific Conference: the program, abstracts* (Ukraine, Chernihiv, September 21–24, 2021). Chernihiv: Publishing House “Desna Polygraph”, 60–61 [in English].
- Parks Canada Agency Corporate Plan 2010–2011. [Electronic resource] URL: <https://parks.canada.ca/docs/pc/plans/plan2010-2011/sec01> (access date 10.10.2024) [in English].
- Rasevich, V.V., Didukh, Ya.P., Daciuk, V.V., & Boiko, G.V. (2021). Dispersal of *Opuntia humifusa* (Cactaceae) in the continental part of Ukraine. *Ukr. Bot. J.*, 78 (1), 62–68 [in English].
- Reznicek, S.A. (1982). Review and prioritization of rare species: Point Pelee National Park. Draft report. Prepared for Parks Canada [in English].
- Simoglou, K.B., Koutsos, T.V., Tan, K. (2019). Report 82. In: New floristic records in the Balkans: 38. Compl. V. Vladimirov, M. Aybeke, V. Matevski, K. Tan. *Phytologia Balcanica*, 19 (1), 153 [in English].
- Sipango, N., Khuliso, R., Sebola A., Hawu, O., Mabelebele, M., Mokoboki, H., & Moyo, B. (2022). Prickly Pear (*Opuntia* spp.) as an Invasive Species and a Potential Fodder Resource for Ruminant Animals. *Sustainability*, 14, 3719. <https://doi.org/10.3390/su14073719> [in English].
- Van Der Wal, J., Evans, N., Wozniczka, I., & Lovett-Doust, L. (2007). Demography of *Opuntia humifusa* occurring in Point Pelee National Park. Prepared for Parks Canada Agency, Point Pelee National Park [in English].
- White, D.J. (2000). COSEWIC assessment and update report on the status of *Opuntia humifusa* in Canada. Committee on the Status of Endangered Wildlife in Canada. Ottawa [in English].

Wildlife species eligible for amendment to list: Species at Risk Act. Environment and Climate Change Canada (ECCC). [Electronic resource] URL: <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/species-risk-act-accord-funding/listing-process/wildlife-species-amendment-list-schedule-1.html> (access date 10.10.2024) [in English].

Yena, A.V. (2012). Spontaneous flora of the Crimean Peninsula. Simferopol: N. Orianda [in English].

Отримано: 23.04.2025

Прийнято: 15.05.2025



УДК 502.5+049.3:556.31
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.33>

ОЦІНКА ІНТЕНСИВНОСТІ ВПЛИВУ КАР'ЄРНОГО ВІДПРАЦЮВАННЯ МЕЖИРІЧНОГО РОДОВИЩА ТИТАНОВИХ РОЗСИПІВ НА ПІДЗЕМНІ ВОДИ

Я. В. Горишнякова¹

В умовах інтенсивного кар'єрного видобутку розсипних титанових руд Межирічного родовища зростає ризик забруднення підземних вод, що загалом впливає на стан водних ресурсів регіону. Відсутність систематичної оцінки інтенсивності цього впливу ускладнює розроблення ефективних заходів захисту підземних вод. Розроблення методології аналізу рівня забруднення водного середовища й оцінювання ефективності природоохоронних заходів є актуальним науковим і практичним завданням. Дослідження спрямоване на розроблення та реалізацію методології оцінювання інтенсивності гідрохімічного впливу кар'єрного видобутку на підземні води в межах Межирічного родовища розсипних титанових руд. Основна увага приділяється оцінюванню поточного стану підземних вод і динаміки змін їхнього хімічного складу на основі даних післяпроектного моніторингу. На основі аналізу даних післяпроектного моніторингу за 2020–2022 роки встановлено, що в зонах впливу кар'єрів і збагачувальних фабрик відбувається поступове зростання в часі концентрацій типових для району та для видобувної діяльності забруднювальних речовин. Виявлено тенденцію до зростання середньоарифметичних значень відносних концентрацій забруднювальних речовин у підземних водах, що вказує на посилення впливу на підземні води техногенних або природних чинників. Аналіз сезонних змін підтвердив, що рівень забруднення підземних вод може змінюватися як залежно від зміни гідрогеологічних умов та інтенсивності виробничої діяльності, так і зі зміною кліматичних чинників.

Уперше в межах Межирічного родовища за розробленою методологією виконано оцінювання інтенсивності впливу гірничодобувної діяльності на підземні води. Уперше виконано комплексний аналіз змін хімічного складу підземних вод із використанням даних післяпроектного моніторингу для оцінювання ефективності природоохоронних заходів. Отримані результати є важливими для екологічної служби підприємства, оскільки дозволяють своєчасно виявляти загрози для підземних вод і розробляти заходи щодо їх мінімізації. Розроблена методологія оцінювання інтенсивності забруднення підземних вод дозволяє здійснювати комплексний аналіз екологічного стану підземних вод в умовах кар'єрного видобутку титанових руд. Запропонований підхід може стати основою для підтвердження ефективності або, у разі необхідності, для вдосконалення вже реалізованих водоохоронних заходів у межах діяльності гірничодобувних підприємств.

Ключові слова: інтенсивність забруднення, підземні води, гідрохімічний режим, родовище титанових руд, екологічна оцінка.

¹ аспірантка

(Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків)

e-mail: yanagorish@ukr.net

ORCID: 0000-0001-7468-8301

ASSESSMENT OF THE INTENSITY OF THE IMPACT OF OPEN-PIT MINING OF THE MEZHRYCHNE TITANIUM PLACER DEPOSIT ON GROUNDWATER

Y. V. Horyshnyakova

The intensive open-pit mining of alluvial titanium ores at the Mezhyrichne deposit increases the risk of groundwater pollution, which generally affects the state of the region's water resources. The lack of a systematic assessment of the intensity of this impact makes it difficult to develop effective groundwater protection measures. The development of a methodology for analyzing the level of water pollution and assessing the effectiveness of environmental protection measures is an urgent scientific and practical task. The study is aimed at developing and implementing a methodology for assessing the intensity of hydrochemical impact of open-pit mining on groundwater within the Mezhyrichne placer titanium ore deposit. The focus is on assessing the current state of groundwater and the dynamics of changes in its chemical composition based on post-project monitoring data. Based on the analysis of post-project monitoring data for 2020–2022, it was found that in the areas of influence of quarries and concentrators, there is a gradual increase in the concentrations of pollutants typical for the area and for mining activities. A tendency to increase the arithmetic mean values of relative concentrations of pollutants in groundwater was revealed, which indicates an increased impact on groundwater from either anthropogenic or natural factors. The analysis of seasonal changes confirmed that the level of groundwater pollution can vary depending on changes in hydrogeological conditions and intensity of production activities, as well as changes in climatic factors.

For the first time, the intensity of the impact of mining activities on groundwater was assessed within the Mezhyrichne deposit using the developed methodology. For the first time, a comprehensive analysis of changes in the chemical composition of groundwater was performed using post-project monitoring data to assess the effectiveness of environmental protection measures. The results obtained are important for the environmental service of the enterprise, as they allow timely detection of threats to groundwater and development of measures to minimize them. The developed methodology for assessing the intensity of groundwater pollution allows for a comprehensive analysis of the ecological state of groundwater in the conditions of open-pit mining of titanium ores. The proposed approach can serve as a basis for confirming the effectiveness or, if necessary, improving the already implemented water protection measures within the activities of mining enterprises.

Key words: intensity of pollution, groundwater, hydrochemical regime, titanium ore deposit, environmental assessment.

Вступ

В умовах кар'єрного відпрацювання Межирічного родовища розсіпних титанових руд потенційно можливий вплив на рівневий і гідрохімічний режим підземних вод, зокрема першого від поверхні четвертинного водоносного горизонту ґрунтових вод. На промисловому майданчику території Товариства з обмеженою відповідальністю (далі – ТОВ) «Межиріченський гірничозбагачувальний комбінат» (далі – «Межиріченський ГЗК» (МГЗК)), у зв'язку з виробничою спрямованістю, розташовано низку об'єктів, які є потенційними джерелами забруднення підземних вод. Найбільш інтенсивні процеси забруднення в районі кар'єрів «Ісаківський», «Південний» і об'єктів збагачувальних фабрик (далі – ЗФ) «Ісаківська» та «Південна», де в результаті технологічних втрат можлива інфільтрація зворотних вод у горизонт ґрунтових вод. Забруднення підземних вод може відбуватися по всій території промислового майданчика, що дозволяє розглядати його як

площинне джерело забруднення підземних вод загалом. Така ситуація потребує проведення післяпроектного моніторингу.

Загальною метою еколого-гідрогеологічних досліджень у складі післяпроектного моніторингу є оцінювання екологічної надійності практичного впровадження передбачених проектом заходів з охорони підземних вод. Значна роль у цьому належить визначенню інтенсивності їх забруднення в разі його появи у процесі реалізації прийнятої технології відпрацювання родовища. Інтенсивність забруднення підземних вод характеризується концентрацією забруднювальних речовин у підземних водах і залежить від характеру та тривалості видобувної діяльності загалом, впливу окремих джерел забруднення, гідрогеологічних умов території розташування кар'єрів, а також від виду й надійності реалізованих водоохоронних заходів. Водночас постає проблема, пов'язана з необхідністю визначення ефективності водоохоронних рішень, передбачених у проекті, їхньої достатності

та практичної надійності для забезпечення екологічних умов, прийнятних для збереження водних ресурсів.

Насамперед у завдання післяпроектного моніторингу входить виявлення початкового етапу забруднення, оскільки воно може свідчити про ненадійність запроектованих водоохоронних заходів і необхідність запобігання подальшому забрудненню підземних вод, тобто запобігання його розвитку, якщо воно вже почалося. Окрім того, зменшити інтенсивність забруднення на початковій стадії значно простіше і, за необхідності, реалізація додаткових водоохоронних заходів найбільш ефективна в цих умовах. В умовах інтенсифікації видобувної діяльності в регіоні на фоні підвищеної вразливості водних ресурсів набувають досить актуального значення дослідження, спрямовані на обмеження розвитку осередків забруднення у водоносних горизонтах. Це можливо лише за умов наявності об'єктивної оцінки щодо інтенсивності впливу об'єктів МГЗК на забруднення підземних вод – основи для ухвалення, за необхідності, додаткових водоохоронних рішень. Актуальність досліджень підтверджується важливістю підтримання екологічної безпеки гірничодобувної діяльності в межах Межирічного родовища, масштаби відпрацювання якого можуть збільшуватися в повоєнний період.

Стан водного середовища в гірничодобувних регіонах вивчали відомі вчені України. Їх дослідження стосувалися вирішення регіональних проблем щодо визначення основних природних і техногенних чинників впливу на якість підземних вод і регіонального прогнозування зміни їхньої якості під впливом закриття шахт (Сляднєв, 2006; Яковлев та ін., 2021; Яковлев та ін., 2022). Розглядалися також аспекти впливу на підземні та поверхневі води техногенних об'єктів гірничопромислового комплексу Калусько-Голинського родовища калійної солі (Іванов, 2013; Кузьменко та ін., 2024) та ДП «Роздільське гірничо-хімічне підприємство (ГПХ) «Сірка»» (Шабанова та ін., 2023). Аналіз попередніх досліджень і публікацій свідчить, що аспекти проблеми, які стосуються визначення впливу відкритого відпрацювання родовища розсіпних титанових руд на екологічний стан підземних вод і оцінювання ефективності передбачених водоохоронних заходів в умовах реалізації запроектованої діяльності, залишаються невирішеними. У зв'язку із цим перед автором постала доцільність оцінювання

інтенсивності впливу як окремих локальних об'єктів, так загалом промайданчика МГЗК на підземні води в межах розрахункової зони можливого порушення екологічного стану водних ресурсів.

Метою досліджень є оцінювання інтенсивності гідрохімічного впливу кар'єрного відпрацювання Межирічного родовища розсіпних титанових руд на підземні води з використанням даних післяпроектного моніторингу, проведеного в межах гірничодобувної діяльності ТОВ «Межиріченський ГЗК». Відповідно до поставленої мети для дослідження були визначені завдання, у перелік яких входять такі:

1. Розроблення методологічного підходу до оцінювання інтенсивності впливу об'єктів МГЗК на підземні води.

2. Оцінювання інтенсивності впливу МГЗК на гідрохімічний режим підземних вод:

- аналіз сучасного гідрохімічного складу підземних вод;

- визначення основних репрезентативних забруднювальних речовин;

- визначення відносних середніх концентрацій забруднювальних речовин;

- вибір методики визначення інтенсивності впливу на забруднення підземних вод.

3. Оцінювання інтенсивності забруднення підземних вод залежно від впливу конкретних технологічних об'єктів і промайданчика МГЗК загалом.

Матеріал і методи

Як основні матеріали для досліджень використовувалися дані післяпроектного моніторингу підземних вод у розрахунковій зоні потенційного впливу об'єктів ТОВ «Межиріченський ГЗК», отримані в період 2020–2022 рр. Проби води відбиралися під час маршрутних досліджень у пунктах спостережень на контрольних майданчиках вимірів, описів і відбору проб згідно з рекомендаціями (ДСТУ ..., 2005). Періодичність відбору проб – двічі на рік: у періоди весняної повені й осінньої межені. Згідно із програмою післяпроектного моніторингу кількість пунктів спостережної мережі – 7 колодязів і 5 свердловин. Усього за період досліджень було відібрано 60 проб підземних вод. У відібраних пробах води визначався вміст макрокомпонентів і специфічних для даної території хімічних речовин – марганцю і титану. Кількісне визначення показників проводилось з використанням стандартних методів під час виконання хіміко-аналітичних досліджень. Вплив гірничодобувної діяльності МГЗК на підземні води проявля-

ється зазвичай у зміні їхньої якості, тобто в забрудненні, а саме – у збільшенні вмісту властивих даній діяльності забруднювальних речовин: мінералізації (сухого залишку), сульфатів, хлоридів, показників жорсткості та специфічних речовин – марганцю й титану. Поняття «забруднення підземних вод» автор розуміє як конкретні кількісні показники якості підземних вод.

Методи дослідження. Для оцінювання впливу функціонування об'єктів МГЗК на підземні води використовувалися методи аналізу, обробки й узагальнення даних післяпроектного моніторингу; методи визначення інтенсивності забруднення підземних вод і методи порівняльного аналізу. Метод аналізу одержаних даних моніторингу полягав у визначенні найбільш характерних, властивих об'єктам МГЗК (репрезентативних), речовин і таких, що містяться в найбільших, порівняно з іншими, кількостях.

Метод обробки даних моніторингу полягав у визначенні відносних середніх концентрацій репрезентативних забруднювальних речовин. Відносні концентрації розраховувалися як відношення фактичних концентрацій компонентів до їх гранично допустимої концентрації (далі – ГДК).

Метод узагальнення даних моніторингу полягав у визначенні узагальнених характеристик забруднення підземних вод, як у межах впливу конкретних джерел, так загалом на території проммайданчика МГЗК. Для цього визначалися сумарні середні відносні концентрації забруднювальних речовин для кожного року проведення післяпроектного моніторингу, визначалися їхні зміни в часі. Розрахунки виконувалися для підземних вод на території проммайданчика МГЗК, гідрохімічний режим яких добре вивчений у процесі проведення післяпроектного моніторингу.

Метод визначення інтенсивності забруднення підземних вод. Для оцінювання ступеня забруднення підземних вод автором використаний порівняльний аналіз концентрацій: фонових; фактичних, одержаних у процесі моніторингових досліджень, і гранично допустимих концентрацій (ГДК), що встановлені в (ДСанПіН ..., 2010). Шляхом порівняльного аналізу проводилося зіставлення отриманих значень із ГДК, установленими для води питного призначення. Тобто визначалась зміна якості води порівняно з її якістю у природних умовах (з фоновими показниками) і з нормативними вимогами до цільового призначення водокористування.

Методологічний підхід до проведення досліджень з оцінювання інтенсивності впливу об'єктів МГЗК на гідрохімічний режим підземних вод. У межах промислового майданчика ТОВ «Межиріченський ГЗК» у наявності чотири основні об'єкти – техногенні джерела впливу на підземні води. Це кар'єр «Ісаківський», кар'єр «Південний», збагачувальна фабрика «Ісаківська» та збагачувальна фабрика «Південна». Наявність впливу зазначених об'єктів на підземні води та його інтенсивність можна визначити, якщо зафіксувати погіршення якості води. Під час проведення післяпроектного моніторингу важливо виділити дві основні стадії погіршення якості води, отже, залежно від них можна визначити наявність впливу гірничодобувної діяльності МГЗК на гідрохімічний режим підземних вод, його інтенсивність (Лобода і Отченаш, 2017): *I стадія (дограничне забруднення)* – початкове забруднення, або ознаки забруднення, коли вміст забруднювальних речовин вищий за фоновий, але менший від ГДК. Для цієї стадії характерне зростання вмісту забруднювальних речовин у часі, хоча воно залишається нижче ГДК; *II стадія (надграничне забруднення)* – коли вміст забруднювальних речовин вищий за ГДК. Згідно з (Лобода і Отченаш, 2017), у стадії I доцільно виділяти 2-а ступеня початкового забруднення: I-а і I-б. У стадії II виділяються 3 ступені забруднення: II-а (А, Б), II-б (В, Г, Д), II-в. У поняття «забруднення» включаються обидва випадки, оскільки і на I і на II стадіях забруднення необхідна реалізація водоохоронних заходів. Інтенсивність впливу об'єктів МГЗК на забруднення підземних вод оцінювалася у два етапи й визначена на основі аналізу особливостей гідрогеологічних умов території, умов взаємозв'язку підземних і поверхневих вод, а також міграційних властивостей хімічних елементів у складі підземних вод.

На першому етапі визначалися відносні концентрації забруднювальних речовин і особливості їх зміни протягом проведення післяпроектного моніторингу. На другому етапі – за узагальненою сумарною середньоарифметичною щодо їх величиною розраховувалася інтенсивність забруднення підземних вод як загалом по території ТОВ «МГЗК», так і в зоні впливу конкретних джерел за період 2020–2022 рр.

Дослідження проводились у такій послідовності:

1) для проведення досліджень з оцінювання інтенсивності впливу об'єктів ТОВ «МГЗК» на забруднення підземних вод визначалися основні, характерні для кар'єрних вод і для стічних вод збагачувальних фабрик МГЗК, забруднювальні речовини – репрезентативні показники впливу видобувної діяльності на хімічний склад підземних вод;

2) для виявлення забруднення підземних вод визначалися відносні концентрації забруднювальних речовин ($C_{відн}$) – (C), які розраховуються як відношення фактичної концентрації конкретного компонента (C) до його гранично допустимої концентрації (ГДК): $C = C / C_{ГДК}$;

3) для встановлення інтенсивності забруднення підземних вод визначалися середні арифметичні значення відносних концентрацій окремих компонентів у пробах води, відібраних у свердловинах і колодязях усередині локальних осередків забруднення;

4) для узагальнення характеристик забруднення підземних вод загалом на території проммайданчика МГЗК впродовж трьох років (термін проведення післяпроектного моніторингу) визначалися сумарні середні відносні концентрації забруднювальних речовин. На основі узагальнених характеристик визначалися градації інтенсивності та встановлювалися стадія та ступінь забруднення підземних вод. Градації інтенсивності забруднення підземних вод представлені в таблиці 1.

Градації I-а й I-б характеризують ті випадки забруднення, коли ще не перевищено ГДК, тобто вода належить до категорії «умовно забруднені води». Градації II-а (А, Б) і II-б (В, Г, Д) відповідають умовам, коли концентрація забруднювальних речовин перевищує їхні ГДК – категорія «забруднені води» (за різної інтенсивності – від 1–5 до 100). Градація II-в належить до категорії «екстремальне забруднення» (>100 ГДК). Варто зазначити, що для токсичних речовин «екстремальне забруднення» класифікується вже за $C = 10$ ГДК і за $C > 10$ ГДК. Залежно від інтенсивності забруднення підземних вод визначалася інтенсивність

впливу МГЗК на підземні води, на основі чого ухвалюються рішення щодо необхідності здійснення водоохоронної діяльності – коригування природоохоронних заходів, що запроєктовані.

Результати

Для оцінювання інтенсивності впливу гірничодобувної діяльності МГЗК на підземні води бралися дані післяпроектного моніторингу, одержані у спостережних пунктах, розміщених у межах зони активної дії основних техногенних джерел, як-от пункти можливого максимального навантаження на підземні води. Для контролю впливу кар'єру «Ісаківський» – Т. 103; кар'єру «Південний» – Т. 108, Т. 109; збагачувальної фабрики «Ісаківська» – Т. 115; збагачувальної фабрики «Південна» – Т. 102. Для оцінювання стану підземних вод у межах фонової ділянки – Т.107. Водночас проводився аналіз даних післяпроектного моніторингу за меженні періоди 2020–2022 рр. У такому разі враховуються найбільш жорсткі природні умови для формування хімічного складу підземних вод і більш надійно проявляється вплив техногенних чинників, тобто забезпечується запас надійності результатів дослідження.

Визначення основних репрезентативних забруднювальних речовин. Для проведення досліджень з оцінювання інтенсивності впливу об'єктів МГЗК на забруднення підземних вод вибрані такі хімічні елементи, характерні для кар'єрних вод і для стічних вод збагачувальних фабрик ТОВ «МГЗК»: *хлориди; сульфати; сухий залишок; марганець і показник загальної жорсткості*. Вони є репрезентативними показниками впливу видобувної діяльності з розроблення Межирічного родовища розсипних титанових руд на хімічний склад підземних вод. Вибір зазначених компонентів продиктований таким. Загальна жорсткість визначається наявністю магнію та кальцію у воді; хлориди та сульфати визначають зміну хімічних типів кар'єрних, стічних і підземних вод; сухий залишок визначається в основному наявністю макрокомпонентів, тобто ці показники дають чітке уявлення про стан підземних вод. Вибір із переліку

Таблиця 1

Градації інтенсивності забруднення підземних вод

№ градації	I-а	I-б	II-а		II-б			II-в
			А	Б	В	Г	Д	
Інтенсивність	<0,5	0,5–1	1–5	5–10	10–30	30–50	50–100	>100

контрольованих специфічних речовин марганцю зумовлений специфікою його поширення та міграції в підземних водах регіону.

Визначення відносних середніх концентрацій забруднювальних речовин. Інтенсивність забруднення підземних вод характеризується відносною середньою та відносною максимальною величиною забруднювальних речовин у середині контурів їх ГДК. У таблицях 2 і 3 наводяться відносні середні концентрації ($C_{\text{відн}}$) зазначених компонентів, розраховані в динаміці (на період літньої та осінньої межени 2020, 2021, 2022 рр.) за даними післяпроектного моніторингу.

Як випливає з таблиць (див. табл. 2 і табл. 3), спостерігаються перепади вмісту відносних концентрацій хімічних елементів у підземних водах на всій території, де

є пункти спостережної мережі моніторингу. Це свідчить про різну інтенсивність впливу як природних, так і техногенних чинників на хімічний склад підземних вод. У зв'язку із цим постала необхідність у виокремленні зон впливу кожного з потенційних джерел забруднення підземних вод на проммайданчику МГЗК. Для порівняння визначався хімічний склад підземних вод на фоновій щодо проммайданчика МГЗК території.

Особливості зміни в часі середньо-арифметичних значень відносних концентрацій хімічних елементів у підземних водах загалом по території проммайданчика МГЗК із 2020 р. до 2022 р. наведені в таблиці 4. Окрім того, для виявлення особливостей зміни інтенсивності впливу об'єктів МГЗК на підземні води після закінчення терміну проведення післяпроектного моні-

Таблиця 2

Відносна концентрація ($C_{\text{відн}}$) хімічних компонентів у підземних водах
(за результатами моніторингу 2020–2021 рр.)

№ № точок опробування	Cl ⁻ , мг/дм ³	SO ₄ ⁻² , мг/дм ³	Сухий залишок, мг/дм ³	Жорсткість загальна, ммоль/дм ³	Mn, мг/дм ³
	С/ГДК	С/ГДК	С/ГДК	С/ГДК	С/ГДК
ГДК, мг/дм ³	350	500	1 500	10	0,10
2020 р.					
Т. 102	7,1	52,8	189,0	3,2	0,19
	0,020	0,106	0,126	0,32	1,9
Т. 103	23,1	148,8	386,0	4,4	0,074
	0,066	0,30	0,26	0,44	0,74
Т. 107	10,6	57,6	166,0	2,4	<0,02
	0,030	0,115	0,110	0,24	0,2
Т. 108	39,0	43,2	225,0	3,6	0,02
	0,111	0,086	0,15	0,36	0,2
Т. 109	24,8	76,8	186,0	3,0	0,02
	0,071	0,154	0,124	0,3	0,2
Т. 115	8,9	374,4	723,0	9,6	0,13
	0,025	0,75	0,482	0,96	1,3
2021 р.					
Т. 102	14,2	96,0	287,0	4,2	0,20
	0,041	0,192	0,192	0,42	2,0
Т. 103	21,3	96,0	263,0	2,6	0,07
	0,061	0,192	0,176	0,26	0,7
Т. 107	21,3	96,0	232,0	2,0	<0,02
	0,061	0,192	0,155	0,2	0,2
Т. 108	35,5	76,8	311,0	3,8	0,02
	0,102	0,154	0,207	0,38	0,2
Т. 109	28,4	144,0	303,0	3,6	0,02
	0,081	0,288	0,202	0,36	0,2
Т. 115	14,2	384,0	737,0	10,0	–
	0,041	0,768	0,492	1,0	–

Таблиця 3

Відносна концентрація ($C_{\text{відн.}}$) хімічних компонентів у підземних водах
(за результатами моніторингу 2022 р.)

№ № точок опробування	Cl ⁻ , мг/дм ³	SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³	Сухий залишок, мг/дм ³	Жорсткість загальна, ммоль/дм ³	Mn, мг/дм ³
	С/ГДК	С/ГДК	С/ГДК	С/ГДК	С/ГДК
ГДК, мг/дм ³	350	500	1500	10	0,10
Т. 102	14,2	96,0	287,0	4,2	0,20
	0,041	0,192	0,191	0,42	2,0
Т. 103	21,3	96,7	263,0	2,6	0,07
	0,061	0,193	0,175	0,26	0,7
Т. 107	21,3	96,0	232,0	2,0	<0,20
	0,061	0,192	0,155	0,2	2,0
Т. 108	35,5	76,8	311,0	3,8	0,02
	0,101	0,154	0,207	0,38	0,2
Т. 109	28,4	144,0	303,0	3,6	0,02
	0,081	0,288	0,202	0,36	0,2
Т. 115	14,2	384,0	737,0	10,0	0,05
	0,040	0,768	0,491	1,0	0,5

Таблиця 4

Середньоарифметичні значення інтенсивності забруднення підземних вод загалом по території проммайданчика ТОВ «МГЗК» за період досліджень у складі післяпроектного моніторингу 2020–2022 рр.

Період досліджень	Середньоарифметичне значення відносних концентрацій компонентів				
	($\bar{C}$), жорсткість	($\bar{C}$), сухий залишок	($\bar{C}$), Cl ⁻	($\bar{C}$), SO ₄ ²⁻	($\bar{C}$), Mn
2020 р.	0,437	0,208	0,054	0,252	0,757
2021 р.	0,437	0,237	0,065	0,298	0,660
2022 р.	0,547	0,282	0,081	0,394	0,930
За весь період досліджень	0,474	0,242	0,066	0,315	0,752
2024 р.	0,330	0,339	0,105	0,206	0,200

торингу автором проводився контроль їх забруднення у 2024 р.

Згідно з наведеними в таблиці даними (див. табл. 4), спостерігається тенденція до незначного зростання середньоарифметичних відносних концентрацій для всіх вибраних компонентів підземних вод. Найбільш помітне зростання характерне для 2022 р. Сумарна величина середньоарифметичних відносних концентрацій у 2020 р. становила 1,108; у 2021 р. – 1,697; у 2022 р. – 2,234. У середньому за 3 роки – 1,849.

У 2024 р. знизились середньоарифметичні відносні концентрації марганцю, сульфатів і жорсткості, а збільшилися – хлоридів і сухого залишку. Сумарна величина середньоарифметичних відносних концентрацій становила 1,180, тобто спостерігалось її зниження порівняно із 2021 і 2022 рр.

Оцінювання інтенсивності забруднення підземних вод у меженні періоди 2020–2022 рр. Оцінювання погіршення якості підземних вод на території ТОВ «МГЗК», її змін у часі (упродовж проведення післяпроектного моніторингу) виконувалися шляхом визначення інтенсивності забруднення підземних вод за загальноприйнятою методикою (Лобода і Отченас, 2017).

На території проммайданчика загалом, а також у зонах впливу окремих об'єктів МГЗК, інтенсивність забруднення підземних вод визначалася за узагальненою сумарною середньоарифметичною відносною величиною жорсткості загальної, сухого залишку, хлоридів, сульфатів і марганцю (табл. 5).

За результатами розрахунків, загалом на території проммайданчика ТОВ «МГЗК» відносні середньоарифметичні концен-

Таблиця 5

Вихідні дані для розрахунків інтенсивності забруднення підземних вод загалом по території ТОВ «МГЗК» і в зоні впливу конкретних джерел за період 2020–2022 рр.

Об'єкти ТОВ «МГЗК»	($\bar{C}$), жорсткість	($\bar{C}$), сухий залишок	($\bar{C}$), хлор-іон	($\bar{C}$), сульфат-іон	($\bar{C}$), Мп
Зона впливу кар'єру «Ісаківський»	0,277	0,175	0,050	0,200	0,76
Зона впливу кар'єру «Південний»	0,337	0,172	0,106	0,158	0,20
Зона впливу збагачувальної фабрики «Південна»	0,373	0,159	0,030	0,137	1,97
Зона впливу збагачувальної фабрики «Ісаківська»	1,240	0,603	0,056	1,030	0,90
Фонові щодо проммайданчика МГЗК ділянка	0,340	0,232	0,059	0,260	0,71
Середньоарифметичне значення відносних концентрацій хімічних елементів у підземних водах загалом по території проммайданчика МГЗК	0,557	0,277	0,061	0,381	0,96

трації не перевищують ГДК: загальна жорсткість підземних вод дорівнює 0,557; сухого залишку – 0,277; хлоридів – 0,061; сульфатів – 0,381; марганцю – 0,96. Сумарна відносна середньоарифметична концентрація для вибраних типових забруднювальних компонентів загалом по території проммайданчика ТОВ «МГЗК» становить 2,236. Найбільший внесок у забруднення робить марганець – типовий для всього регіону елемент у підземних водах. Його сумарна середньоарифметична відносна концентрація в підземних

водах на території фонові ділянки становить 0,71.

Сумарні відносні концентрації забруднювальних речовин, розраховані для оцінювання інтенсивності забруднення підземних вод у зонах впливу конкретних об'єктів МГЗК, їх розподіл за градаціями наведено в таблиці 6.

Ці концентрації потрібні як для характеристики кожної конкретної області впливу, так і для порівняння цих областей одна з одною, а також для визначення їхньої узагальненої характеристики.

Таблиця 6

Інтенсивність забруднення підземних вод за сумарною відносною середньоарифметичною концентрацією жорсткості, сухого залишку, хлоридів, сульфатів і марганцю в зонах впливу окремих джерел забруднення (за період 2020–2022 рр.)

№ градації	I-а	I-б	II-а		II-б			II-в
			А	Б	В	Г	Д	
Інтенсивність	<0,5	0,5–1	1–5	5–10	10–30	30–50	50–100	>100
	Зона впливу кар'єру «Ісаківський»							
			1,462					
	Зона впливу кар'єру «Південний»							
		0,973						
	Зона впливу збагачувальної фабрики «Ісаківська»							
			3,829					
	Зона впливу збагачувальної фабрики «Південна»							
			2,669					
Фонові ділянка			1,601					
Проммайданчик загалом			2,236					

Обговорення

Аналіз даних післяпроектного моніторингу, проведеного в період 2020–2022 рр., засвідчив наявність поступового зростання концентрацій забруднювальних речовин у зонах впливу кар'єрів і збагачувальних фабрик. Встановлено, що середньоарифметичні значення відносних концентрацій для ключових хімічних елементів мають тенденцію до підвищення, а сумарний рівень забруднення підземних вод на території проммайданчика МГЗК з 1,108 у 2020 р. зріс до 2,234 у 2022 р.

Як свідчать результати досліджень, у виділених зонах впливу конкретних джерел у межах проммайданчика МГЗК підземні води за інтенсивністю забруднення належать до градації II-а (А) – («забруднені води»), за винятком зони впливу кар'єру «Південний», де підземні води характеризуються інтенсивністю, що входить у градацію I-б («умовно забруднені води»). Узагалі інтенсивність забруднення підземних вод у зонах впливу збагачувальних фабрик вища, ніж у зонах впливу кар'єрів. Зокрема, у зоні впливу кар'єру «Ісаківський» вона становить 1,462, кар'єру «Південний» – 0,973, ЗФ «Ісаківська» – 3,829, ЗФ Південна» – 2,669. Максимальна інтенсивність забруднення підземних вод у градації II-а (А), що простежується в зоні впливу збагачувальних фабрик, може свідчити про наявність технологічних втрат зворотних вод на цих підприємствах і про можливий їхній вплив на підземну гідросферу. Узагальнена інтенсивність забруднення підземних вод на проммайданчику загалом становить 2,236. Водночас область забруднення підземних вод входить у градацію II-а (А) (категорія «забруднені води»).

Така ситуація може свідчити про наявність впливу гірничодобувної діяльності МГЗК на гідрохімічний режим підземних вод, отже, про ненадійність передбачених проектом і реалізованих водоохоронних рішень.

Проте варто врахувати, що підземні води на фоновій щодо проммайданчика МГЗК ділянці мають інтенсивність забруднення 1,601 і також відносяться до градації II-а (А) – до категорії «забруднені води». Тобто навіть за межами впливу проммайданчика загалом хімічний склад підземних вод характеризується підвищеним умістом компонентів, властивих і технології видобування та збагачення титанової руди (жорсткість загальна, сухий залишок і марганець). Отже,

метод порівняння дає змогу виявити наявність впливу на особливості формування забруднення підземних вод не лише гірничозбагачувального комплексу ТОВ «МГЗК». Причиною забруднення підземних вод, окрім техногенних чинників, можуть бути і природні (зокрема, кліматичні) фактори. Визначення їхнього внеску в забруднення надзвичайно важливе, оскільки від цього залежить оцінка надійності вже реалізованих водоохоронних заходів.

З огляду на те, що ступені забруднення підземних вод I-а й I-б та II-а (А) зазвичай спостерігаються поблизу порівняно невеликих за інтенсивністю джерел (Лобода і Отченаш, 2017), автор вважає, що інтенсивність впливу діяльності ТОВ «МГЗК» перебуває на рівні, який успішно можна знизити оперативною реалізацією додаткових водоохоронних заходів організаційного характеру. Зокрема, завдяки впровадженню запропонованих автором заходів щодо зниження технологічних втрат у процесі зворотного водокористування на збагачувальних фабриках інтенсивність забруднення підземних вод на проммайданчиках (яка у 2020 р. становила 1,108; у 2021 р. – 1,697; у 2022 р. – 2,236, а в середньому за 3 роки – 1,849) у 2024 р. знизилась до 1,180.

Отже, виділення ступенів інтенсивності забруднення підземних вод має сенс стосовно своєчасного здійснення водоохоронних заходів, упровадження яких є найбільш ефективним на стадіях I і II-а.

Підсумовуючи обговорення одержаних результатів досліджень, варто зазначити, що методологічний підхід, який використовувався для визначення інтенсивності впливу об'єктів МГЗК на підземні води, поєднує в собі кількісний аналіз концентрацій забруднювальних компонентів із динамікою їх зміни в часі. Застосування методології градаційного оцінювання рівня забруднення дозволило не лише ідентифікувати наявність забруднення і оцінити інтенсивність негативних наслідків для водних ресурсів, а й визначити пріоритетність термінів першочергового впровадження водоохоронних заходів залежно від інтенсивності впливу конкретних джерел забруднення.

Порівняльний аналіз результатів досліджень з аналогами. Результати досліджень, одержані за розробленою автором методологією, являють собою показники екологічного стану водних ресурсів. Діапазон їх зміни дозволив оцінити не лише наявність чи відсутність забруднення та його інтен-

сивність, але й надійність водоохоронних заходів, уже впроваджених у технологію гірничозбагачувальної діяльності МГЗК. Це відрізняє їх від результатів, одержаних за використання традиційних підходів до проведення досліджень, коли оцінка забруднення часто є просто констатацією факту без аналізу ефективності природоохоронних заходів. Оскільки більшість аналогічних досліджень у гірничодобувних регіонах України орієнтована на регіональне оцінювання впливу на підземні води (зокрема, аналіз екологічної ситуації на Донбасі (Сляднєв, 2006; Яковлев та ін., 2021; Яковлев та ін., 2022) або в Калузько-Голинському родовищі калійної солі (Кузьменко та ін., 2024)) та на поверхневі води (оцінювання впливу об'єктів гірничо-хімічного підприємства ДП «Роздільське гірничо-хімічне підприємство (ГПХ) «Сірка»» на водні об'єкти (Шабанова та ін., 2023)), локальний підхід має особливу цінність. Він дозволяє оцінювати інтенсивність впливу локальних джерел на забруднення підземних вод, що є надзвичайно важливим для своєчасного й оперативного ухвалення водоохоронних рішень для конкретних умов відкритого відпрацювання на рівні окремих ділянок родовища.

Наукова новизна досліджень. У процесі проведення аналізу одержаних результатів досліджень варто відзначити наукову новизну реалізованої методології оцінювання інтенсивності впливу кар'єрного відпрацювання Межирічного родовища на підземні води. Наукова новизна досліджень полягає в розробленні методологічних принципів проведення оцінювання інтенсивності впливу гірничодобувної діяльності ТОВ «Межиріченський ГЗК» на підземну гідросферу, а також у визначенні напрямів адаптації методики оцінювання інтенсивності забруднення підземних вод до оцінювання інтенсивності впливу МГЗК на їхній гідрохімічний режим. Методологія є досить ефективною і надає можливість на етапі післяпроектного моніторингу своєчасно вдосконалити водоохоронні аспекти прийнятої технології відпрацювання Межирічного родовища та технології збагачення титанової руди. Особлива цінність запропонованого підходу полягає в можливості його використання у вирішенні проблем, пов'язаних зі збільшенням техногенного тиску на підземні води в результаті відпрацювання інших родовищ титанової руди, наявних у регіоні.

Запропонована методологія оцінювання інтенсивності впливу кар'єрного видобутку Межирічного родовища титанових руд на підземні води є новим підходом, що дозволяє здійснювати комплексний аналіз екологічного стану підземних вод у початковий період реалізації проєктованої діяльності. Серед її переваг можна виділити: локальний підхід до оцінювання інтенсивності забруднення, урахування динаміки зміни забруднення в часі, урахування специфіки титанових родовищ, а також можливість оцінювання ефективності природоохоронних заходів, можливість оперативного ухвалення рішень щодо вдосконалення природоохоронних заходів на етапі післяпроектного моніторингу.

Перевага запропонованого підходу до оцінювання впливу на підземні води полягає також у можливості виявлення початкової стадії забруднення, установлення стійкої тенденції погіршення якості підземних вод, навіть якщо не перевищуються гранично допустимі значення, своєчасного впровадження запобіжних заходів для унеможливлення розвитку подальшого забруднення.

Розроблена методологія може бути адаптована до діяльності інших гірничодобувних підприємств, що робить її універсальним інструментом післяпроектного моніторингу, результати якого можуть використовуватися екологічними службами для коригування природоохоронних заходів і розроблення стратегії мінімізації впливу на підземні води.

Висновки

З метою оцінювання рівня екологічної безпеки в умовах відкритої розробки Межирічного родовища розсипних титанових руд визначено методологічні принципи, запропоновано напрями дослідження та оцінено інтенсивність впливу гірничодобувної діяльності ТОВ «Межиріченський ГЗК» на підземні води на основі оцінювання інтенсивності забруднення підземних вод.

Виявлення інтенсивності впливу на підземні води, що відповідає початковій стадії забруднення, особливо необхідне у зв'язку із профілактичними заходами щодо запобігання забрудненню підземних вод, запобігання його розвитку, якщо воно вже почалося (ступені забруднення I-а й I-б, II-а (A)).

Одержані результати свідчать про доцільність коригування вже реалізованих водоохоронних заходів і слугують підґрунтям для встановлення тенденції та прогнозу зміни в часі екологічного стану підземних

вод в умовах реалізації технології гірничодобувної діяльності МГЗК.

Методологічний підхід, розроблений для оцінювання інтенсивності впливу МГЗК на підземні води, має широкі перспективи застосування в умовах діючих кар'єрів на етапі початкового періоду відпрацювання родовищ корисних копалин у різних гірничодобувних регіонах України.

Варто зазначити, що встановлена у 2020–2022 рр. тенденція збільшення середньоарифметичних відносних концентрацій забруднювальних речовин у підземних водах зумовлює необхідність виконання прогностичних розрахунків на основі вірогідного моделювання числових рядів. Це дозволить виявити роль випадкових і закономірних процесів у формуванні якості підземних вод і встановити причину тенденції збільшення концентрацій зазначених компонентів у підземних водах як на території промайданчика МГЗК загалом, так і на території фонові ділянки. На основі результатів прогнозу буде визначатися доцільність коригування реалізованих водоохоронних заходів.

Практичне застосування одержаних результатів. Оцінювання інтенсивності впливу об'єктів МГЗК на підземні води та виявлення їх початкового забруднення мають досить велике практичне значення, оскільки дозволяють оперативно реагувати на появу небезпечних змін гідрохімічного режиму. Одержані результати на етапі досліджень у складі післяпроектного моніторингу вже можуть використовуватися для ухвалення рішень щодо вдосконалення природоохоронних заходів в умовах прийнятої технології видобування та збагачення титанової руди.

Рекомендації щодо перспективи проведення подальших досліджень. Проведення досліджень з оцінювання інтенсивності впливу на забруднення підземних вод рекомендується продовжити в умовах запланованого розширення території видобувної діяльності ТОВ «МГЗК». Це дасть змогу виявити найбільш екологічно небезпечні ділянки в межах промайданчика, визначити напрямки поширення можливого забруднення в зонах впливу нових об'єктів і своєчасно знизити техногенне навантаження на водне середовище.

Список використаної літератури

ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною [Чинний від 12.05.2010 р.]. Київ : Міністерство охорони здоров'я України, 2010 [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text> (дата звернення: 04.02.2025).

ДСТУ ISO 5667-11:2005. Якість води. Відбирання проб. Ч. 11. Настанови щодо відбирання проб підземних вод [Чинний від 01.07.2006 р.]. Київ : Держспоживстандарт України, 2005.

Іванов Є., Сивий М., Паранько І. Географія мінеральних ресурсів України : монографія. Львів : Простір М, 2013. 684 с.

Кузьменко Е., Багрій С., Чепурний І., Чепурна Т. Моніторингові дослідження еколого-гідрогеохімічної ситуації в зоні впливу техногенних об'єктів гірничопромислового комплексу Калуш-Голинського родовища калійної солі. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2024. Т. 15. № 2. С. 83–95. <https://doi.org/10.69628/esbur/2.2024.83>.

Лобода Н., Отченаш Н. Підземні води, їх забруднення та вплив на навколишнє середовище : навчальний посібник. Одеса : ОДЕУ, 2017, 199 с.

Сляднєв В. Оцінка впливу уразливості підземних вод на екологічну безпеку Центрального Донбасу в умовах закриття вугільних шахт : дис. ... канд. геол. наук : 21.06.01. Київ, 2006, 171 с.

Шибанова А., Мітрясова О., Джумеля Е., Руда М. Оцінювання впливу відходів гірничо-хімічних підприємств на якість поверхневих вод. *Екологічна безпека та природокористування*. 2023. Т. 45. № 1. С. 17–28. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.17-28>.

Яковлєв Є., Сплодитель А., Чумаченко С. Оцінка еколого-геохімічного стану поверхневих вод Донбасу. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2021. Т. 28. С. 129–137 [Електронний ресурс]. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/37091> (дата звернення: 16.01.2025).

Яковлєв Є., Пиріков О., Анпілова Є., Чумаченко С. Оцінення і прогнозування змін екологічного стану підземної і поверхневої гідросфери Донбасу на етапі постмайнінгу. *Мінеральні ресурси України*. 2022. № 1. С. 43–51 [Електронний ресурс]. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mru_2022_1_8 (дата звернення: 16.01.2025).

References

- Ministerstvo okhorony zdorovia Ukrainy (2010). Hihienichni vymohy do vody pytnoi, pryznache-noi dlia spozhivannia liudynoiu [Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption] (DSanPiN 2.2.4-171-10). [Electronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text> (access date 12.01.2025) [in Ukrainian].
- Derzhspozhyvstandart Ukrainy (2005). DSTU ISO 5667-11:2005. Yakist vody. Vidbyrannia prob. Chastyna 11. Nastanovy shchodo vidbyrannia prob pidzemnykh vod [Water quality. Sampling. Part 11. Guidance on sampling of groundwater]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
- Ivanov, Y., Syvyi, M., & Paranko, I. (2013). Heohrafiia mineralnykh resursiv Ukrainy: Monohrafiia [Geography of mineral resources of Ukraine: Monograph]. Prostir M [in Ukrainian].
- Kuzmenko, E., Bahrii, S., Chepurnyi, I., & Chepurna, T. (2024). Monitorynhovi doslidzhennia ekoloho-hidroheokhimichnoi sytuatsii u zoni vplyvu tekhnohennykh ob'ektiv hirnychopromyslo-voho kompleksu Kalush-Holynskoho rodovyshcha kalinoi soli [Monitoring studies of the ecological-hydrogeochemical situation in the impact zone of technogenic objects of the Kalush-Holyn potash deposit mining-industrial complex]. *Ekolohichna bezpeka ta zbalansovane resursokorystuvannia* [Environmental safety and sustainable resource use], 15 (2), 83–95. <https://doi.org/10.69628/esbur/2.2024.83> [in Ukrainian].
- Loboda, N., & Otchenash, N. (2017). Pidzemni vody, yikh zabrudnennia ta vplyv na navkolyshnie seredovyshche [Groundwater, its pollution and environmental impact]. Odesa : ODEU [in Ukrainian].
- Sliadniev, V. (2006). Otsinka vplyvu urazlyvosti pidzemnykh vod na ekolohichnu bezpeku Tsentralnogo Donbasu v umovakh zakryttia vuhilnykh shakht [Assessment of the impact of ground-water vulnerability on the environmental safety of the Central Donbas in the context of coal mine closure] (Candidate dissertation). Instytut heokhimii navkolyshnoho seredovyshcha NAN i MNS Ukrainy, Kyiv [in Ukrainian].
- Shybanova, A., Mitriasova, O., Dzhumelia, E., & Ruda, M. (2023). Otsiniuvannia vplyvu vidkho-div hirnycho-khimichnykh pidpriemstv na yakist poverkhnevyykh vod [Assessment of the impact of mining-chemical enterprise waste on the quality of surface waters]. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia* [Environmental safety and nature management], 45 (1), 17–28. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.17-28> [in Ukrainian].
- Yakovlev, Y., Splodytel, A., & Chumachenko, S. (2021). Otsinka ekoloho-heokhimichnoho stanu poverkhnevyykh vod Donbasu [Assessment of the ecological-geochemical state of surface waters in Donbas]. *Ukrainskyi hidrometeorolohichnyi zhurnal* [Ukrainian Hydrometeorological Journal], 28, 129–137. [Electronic resource] URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/37091> (access date 16.01.2025) [in Ukrainian].
- Yakovliev, Ye., Pyrykov, O., Anpilova, Ye., & Chumachenko, S. (2022). Otsinennia i prohnozuvannia zmin ekolohichnoho stanu pidzemnoi i poverkhnevoi hidrosfery Donbasu na etapi postmainihu [Assessment and forecasting of changes in the ecological state of the underground and surface hydrosphere of Donbas at the post-mining stage]. *Mineralni resursy Ukrainy* [Mineral resources of Ukraine], 1, 43–51. [Electronic resource] URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mru_2022_1_8 (access date 16.01.2025) [in Ukrainian].

Отримано: 03.03.2025

Прийнято: 15.05.2025



УДК 502.51-049.5
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.34>

РАДІОАКТИВНІ ОПАДИ В АТМОСФЕРІ ТА ЇХ РАДІОЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ У КОНТЕКСТІ ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ

К. В. Григор'єв¹, А. І. Григор'єва²

Актуальність представлених досліджень пов'язана з підвищеною увагою до організації радіаційного та радіоекологічного моніторингу на території України під час військових дій. Це пов'язано з підвищенням ризиків радіоекологічних аварій, загрози зміни радіаційної ситуації, потрапляння радіонуклідів в атмосферне повітря внаслідок постійних обстрілів з боку РФ ракетами та безпілотниками територій поблизу АЕС.

Метою є проведення радіоекологічних досліджень з оцінювання радіонуклідного складу опадів з атмосфери в м. Миколаєві та Миколаївській області, потужності ефективної дози атмосферного повітря та розроблення пропозицій для оптимізації радіоекологічного моніторингу атмосферного повітря під час військових дій. Методами дослідження виступали аналіз сучасної системи радіаційного моніторингу атмосферного повітря в Україні, аналіз випадків фіксації зміни радіонуклідного складу атмосферного повітря через пересування радіоактивної хмари, результати власних спостережень за рівнем потужності ефективної дози її радіометрії проб опадів з атмосфери.

У статті представлено матеріали досліджень за потужністю ефективної дози, рівнем загальної бета-активності опадів з атмосфери, вмістом ¹³⁷Cs в опадах з атмосфери в місті Миколаєві у 2023–2024 рр., порівняльного аналізу з показниками в минулі роки та в населених пунктах Миколаївщини. Для повноти оцінювання ефективності й оперативності наявної системи радіоекологічного моніторингу атмосферного повітря представлено аналіз результатів радіометрії проб атмосферного повітря на Миколаївщині під час пересування радіоактивної хмари з ¹⁰⁶Ru восени 2017 р. Наукова новизна полягає у розширенні уявлення про формування радіоекологічної ситуації під час військових дій, яка може визначатися розповсюдженням у просторі чистих бета-випромінюючих радіонуклідів і потребуватиме додаткового її обстеження. Практична значущість представлених результатів полягає в отриманні даних польових досліджень для дозиметрії населення м. Миколаєва та Миколаївщини під час військових дій РФ, для картографічного моделювання поточного формування індивідуальної та колективної дози зовнішнього опромінення населення на визначених територіях.

Ключові слова: опади з атмосфери, радіонукліди, потужність ефективної дози, радіоактивна хмара, радіоекологічний моніторинг.

¹ аспірант кафедри екології
(Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв)
ORCID: 0000-0003-2804-2758

² доктор біологічних наук, професор, завідувачка кафедри екології
(Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв)
ORCID: 0000-0003-2804-2758

RADIOACTIVE FALLOUT IN THE ATMOSPHERE AND ITS RADIOECOLOGICAL MONITORING IN THE CONTEXT OF MILITARY OPERATIONS

K. V. Grygoriev, L. I. Grygorieva

The relevance of the presented research is related to the increased attention to the organisation of radiation and radioecological monitoring on the territory of Ukraine during military operations. This is due to increased risks of radioecological accidents, threats of changes in the radiation situation, and release of radionuclides into the atmosphere as a result of constant shelling of the territories near NPPs by Russian missiles and drones.

The objective is to conduct radioecological studies to assess the radionuclide composition of precipitation from the atmosphere in Mykolaiv and Mykolaiv region, the effective dose rate of atmospheric air and to develop proposals for optimising radioecological monitoring of atmospheric air during military operations.

The research methods were an analysis of the current system of radiation monitoring of atmospheric air in Ukraine, analysis of cases of recording changes in the radionuclide composition of atmospheric air due to the movement of a radioactive cloud, results of own observations of the level of effective dose rate and radiometry of atmospheric precipitation. The article presents the results of studies on effective dose rate, level of total beta activity of atmospheric precipitation, content of ^{137}Cs in atmospheric precipitation in Mykolaiv in 2023-2024, comparative analysis with the indicators of previous years and in the settlements of Mykolaiv region. To fully assess the effectiveness and efficiency of the current system of radioecological monitoring of atmospheric air, the results of radiometry of atmospheric air samples in the Mykolaiv region during the movement of the radioactive cloud with ruthenium-106 in autumn 2017 are presented. The scientific novelty lies in expanding the understanding of the radioecological situation during military operations, which may be determined by an additional load due to the spread of pure beta-emitting radionuclides in space and will require additional survey. The practical significance of the presented results lies in obtaining field research data for dosimetry of the population of Mykolaiv and Mykolaiv region during military actions of the Russian Federation, for cartographic modelling of the current formation of individual and collective external dose to the population in certain areas.

Key words: atmospheric precipitation, radionuclides, effective dose rate, radioactive cloud, radioecological monitoring.

Вступ

Радіаційно-екологічний моніторинг атмосферного повітря є одним з інструментів вчасного інформування й убезпечення людей та біоти від опромінення. Радіоактивний пил, що міститься в повітрі, надзвичайно небезпечний для людини (Барбашев і Скалозубов, 2012; Shogo et al., 2025). Навіть за середнього рівня його загальної радіоактивності мікроскопічні пилові частинки можуть мати високий рівень радіоактивності. Потрапляючи з течією крові до внутрішніх органів та осідаючи там, вони піддають локальному опроміненню навколишні тканини. Це, зі свого боку, з високою імовірністю призводить до розвитку ракових клітин (Фаррахов, 2022). Особливу небезпеку становлять об'єкти атомно-енергетичного комплексу, оскільки надзвичайні ситуації на них супроводжуються значними зонами ураження як за площею, так і за висотою в атмосфері, а також значними медичними наслідками (Кустов та ін., 2019; Fujibuchi et al., 2024). За час агресії РФ проти України через постійні обстріли територій ракетами та безпілотними апаратами підвищилася увага до радіаційної безпеки

на території України (Вітько, 2022; Вітько, 2023), особливо поблизу АЕС. Як відомо, у перший день вторгнення РФ у 2022 р. Чорнобильська АЕС та Зона відчуження були захоплені російським агресором; ворог окупував Запорізьку АЕС, яка зазнала обстрілів танковими снарядами, піддав обстрілам ядерну установку в Харківському фізико-технічному інституті, а над АЕС України неодноразово зафіксовано прольоти крилатих ракет (Литвиненко, 2023). У 2022 році неодноразово відбувалися переривання підключення українських АЕС до енергомережі, зокрема, в листопаді через російські ракетні удари відбулося автоматичне відключення від електромережі Рівненської, Південноукраїнської та Хмельницької АЕС (Бібік та ін., 2025). Науковці актуалізують питання радіаційного впливу під час військових дій (Вітько, 2023). Зокрема, на останнє було вказано у вступному слові генерального директора МАГАТЕ Рафаеля Маріано Гроссі у березні 2022 року під час проголошення обговорення наслідків конфлікту в Україні, спричиненого вторгненням РФ. Актуальними залишаються питання моніторингу за радіаційним забрудненням

у випадку аварії на АЕС та її транскордонного характеру (Новосолов і Масько, 2019; Вітько та ін., 2020б; Калда та ін., 2022), питання своєчасного реагування на радіонуклідне забруднення довкілля під час ядерних аварій (Iatsyshyn, 2023).

За визначенням науковців у сфері радіаційної безпеки, радіаційно-екологічний (радіаційний) моніторинг довкілля – це комплексна інформаційно-технічна система регулярних спостережень за радіаційним станом навколишнього середовища, процесами міграції та накопичення радіонуклідів, потенційно небезпечними явищами тощо, яка реалізується за допомогою спеціального обладнання (систем, комплексів чи окремих приладів) для оцінювання та прогнозування радіаційного стану довкілля. Практикуються радіоекологічні спостереження за окремими підприємствами, особливо підприємствами ядерного паливного циклу й іншими, які є джерелами викидів радіоактивних речовин у навколишнє середовище (Вітько та ін., 2020а, Вітько та ін. 2020б). Ефективне функціонування мереж радіаційного моніторингу є важливим завданням для кожної країни (Iatsyshyn et al., 2023). Сьогодні відомі ряд висновків щодо вдосконалення системи моніторингу атмосферного розсіювання радіоактивних матеріалів через переосмислення наслідків для довкілля, пов'язаних з аварією на АЕС Фукусіма-1 (Povinec et al., 2021; Shogo Takahara, 2025). Дослідниками пропонується стратегія оптимізації мереж радіаційного моніторингу атмосферного повітря для ефективного прогнозування забруднених територій та рівнів радіації під час аварій на АЕС (Gellenoncourt et al., 2025), зміни системи реагування на надзвичайні ситуації (Chen et al., 2022). Є пропозиції щодо збільшення кількості мобільних постів спостереження; підвищення інформативності електронних карт, можливості самостійного аналізу картографічних даних (Iatsyshyn et al., 2023).

Метою є проведення радіоекологічних досліджень радіоактивності опадів з атмосфери на території м. Миколаєва та Миколаївської області під час військових дій, визначення можливих неврахованих факторів, що впливають на радіаційний стан повітряного середовища, а також розроблення пропозицій для оптимізації радіоекологічного моніторингу атмосферного повітря в цей період.

Матеріал і методи

Вимірювання потужності дози гамма-випромінювання виконувалися за допомогою станцій індикативних вимірювань SaveDnipro та дозиметра МКС-05 ТЕРРА на рівні не нижче ніж 1 м від поверхні землі. Вимірювання дозиметром МКС-05 ТЕРРА здійснювалися два-три рази на тиждень. Спостереження за потужністю ефективної дози на території м. Миколаєва відбувалися за двома пунктами спостережень: пункт 1 – вул. Лазурна, 5; пункт 2 – вул. 68 Десантників, 10.

У дослідженні використано матеріали спостережень лабораторії зовнішньої дозиметрії ВП «Південноукраїнська АЕС» (ПАЕС) щодо потужності ефективної дози, отримані на контрольних постах у 30-кілометровій зоні ПАЕС на території Миколаївської області; дані, зібрані під час виконання робіт із моніторингу нульового фону навколо ПАЕС (Томілін, 1980); а також матеріали спостережень за потужністю експозиційної дози на території Миколаївщини.

Здійснено збір опадів з атмосфери седиментаційним методом із подальшим спалюванням проби та радіометрією проб золи на радіометричній установці та на гамма-спектрометричній установці SBS-50М з напівпровідниковим детектором ДГДК-125. Збір опадів з атмосфери в місті здійснено на відкритій території. Планшет для збору опадів мав розміри 1 x 1 м². Експозиція збору опадів становила 1–3 місяці. Розрахунок активності опадів з атмосфери здійснено в одиницях Бк/(місяць*м²).

Для аналізу використано дані щомісячних вимірювань радіонуклідного складу опадів з атмосфери в пунктах спостереження навколо ПАЕС у передпусковий період та у 2017 р. (під час радіоактивної хмари з рутенієм-106).

Результати та їх обговорення

Результати спостережень за потужністю ефективної дози в м. Миколаєві за двома пунктами спостережень наведено в таблиці 1.

З результатів вимірювання маємо, що середнє значення потужності ефективної дози в м. Миколаєві у 2023–2024 рр. становило $0,12 \pm 0,01$ мкЗв/год.

Результати обчислення використано для створення карти EDRA_Myko (Effective dose rate of atmospheric air, Mykolaiv) на базі географічної інформаційної системи QGIS (рис. 1).

Таблиця 1
Середньомісячні значення потужності ефективної дози в м. Миколаєві у 2023–2024 рр.,
 $\bar{X} \pm 2\sigma$, мкЗв/год

Місяць	Пункт 1		Пункт 2	
	2023 р.	2024 р.	2023 р.	2024 р.
Січень	0,14 ± 0,03	0,14 ± 0,03	0,12 ± 0,02	0,11 ± 0,02
Лютий	0,12 ± 0,03	0,13 ± 0,03	0,10 ± 0,03	0,11 ± 0,03
Березень	0,12 ± 0,03	0,12 ± 0,03	0,12 ± 0,03	0,12 ± 0,03
Квітень	0,14 ± 0,02	0,14 ± 0,02	0,12 ± 0,03	0,13 ± 0,03
Травень	0,12 ± 0,03	0,12 ± 0,03	0,10 ± 0,02	0,11 ± 0,02
Червень	0,11 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,13 ± 0,03	0,13 ± 0,03
Липень	0,12 ± 0,02	0,12 ± 0,02	0,11 ± 0,03	0,12 ± 0,03
Серпень	0,10 ± 0,03	0,12 ± 0,03	0,10 ± 0,03	0,12 ± 0,03
Вересень	0,13 ± 0,03	0,13 ± 0,03	0,12 ± 0,03	0,12 ± 0,03
Жовтень	0,12 ± 0,01	0,12 ± 0,01	0,11 ± 0,03	0,12 ± 0,03
Листопад	0,11 ± 0,01	0,11 ± 0,01	0,11 ± 0,03	0,11 ± 0,03
Грудень	0,12 ± 0,02	0,12 ± 0,02	0,12 ± 0,01	0,12 ± 0,01
Середньорічне	0,11 ± 0,02	0,12 ± 0,02	0,12 ± 0,03	0,12 ± 0,03

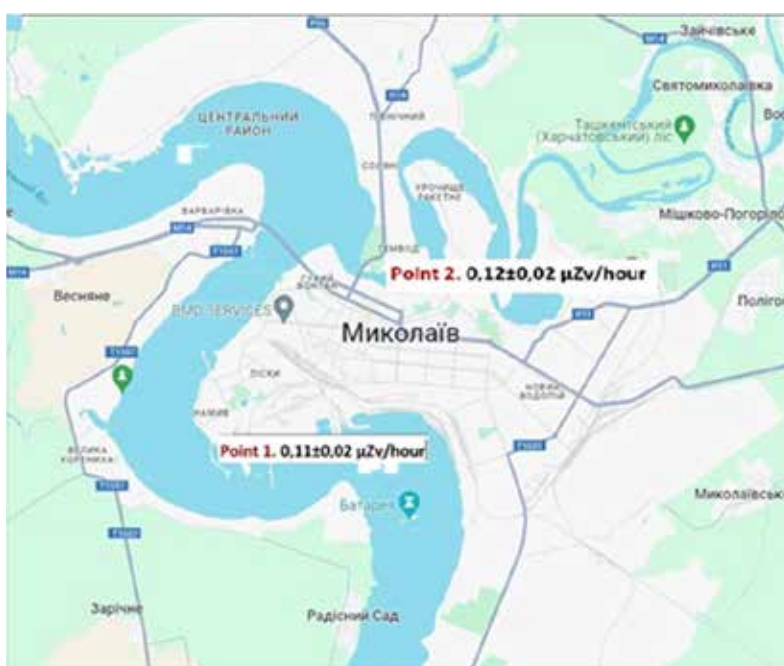


Рис. 1. Фрагмент карти EDRA_Myko (Effective dose rate of atmospheric air, Mykolaiv)

Для порівняння проаналізовано дані про радіаційний фон на місцевості 30-кілометрової зони ПАЕС (табл. 2).

Як видно з таблиці 2, середні значення потужності ефективної дози атмосферного повітря в контрольних постах коливалися від 0,09 до 0,15 мкЗв/год. Розкид цих величин обумовлений геологічними особливостями Миколаївщини та наявністю в центрі та на півночі області геологічних розломів із

виходом кристалічних порід (які характеризуються більш високим вмістом природних радіонуклідів рядів уран-радію і торію). Саме для територій центру та півночі області характерні більш високі величини потужності ефективної дози на відкритій місцевості.

Ці показники майже не відрізнялися від значень, які отримані під час моніторингу «нульового» фону в районі ПАЕС за

Таблиця 2

Середньомісячні величини потужності ефективної дози в населених пунктах
30-кілометрової зони ПАЕС у 2022, 2023, 2024 рр.

Пункт спостереження	$\bar{X} \pm 2\sigma$, мкЗв*/год		
	2022 р.	2023 р.	2024 р.
На проммайданчику ПАЕС	0,11 ± 0,02	0,12 ± 0,02	0,12 ± 0,02
смт Арбузинка	0,13 ± 0,03	0,15 ± 0,03	0,15 ± 0,03
с. Бузьке	0,13 ± 0,03	0,14 ± 0,03	0,14 ± 0,03
с. Агрономія	0,14 ± 0,03	0,14 ± 0,02	0,14 ± 0,02
смт Костянтинівка	0,10 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,11 ± 0,02
с. Іванівка	0,12 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,11 ± 0,02
с. Благодатне	0,13 ± 0,02	0,13 ± 0,02	0,13 ± 0,02
м. Вознесенськ	0,10 ± 0,02	0,10 ± 0,02	0,10 ± 0,02
смт Олександрівка	0,13 ± 0,02	0,12 ± 0,02	0,12 ± 0,02
смт Доманівка	0,11 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,11 ± 0,02
с. Богданівка	0,12 ± 0,03	0,13 ± 0,03	0,13 ± 0,03
м. Южноукраїнськ	0,10 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,11 ± 0,02

1979–1980 рр. Найбільші величини потужності ефективної дози характерні для ділянок, де скелясті породи з рожево-сірих гранітів виходять на поверхню: це території вздовж узбережжя р. Південний Буг. У цих місцях потужність ефективної дози перебувала в межах 0,25–0,35 мкЗв/год. На відстані 5–10 км у бік від русла річки гранітні масиви частково вкриті осадовими породами, тому потужність дози гамма-випромінювання відкритої місцевості в цих місцях зменшувалася до 0,10–0,11 мкЗв/год.

Цей порівняльний аналіз вказав, що в м. Миколаєві та в населених пунктах Миколаївської області в період військових дій величини потужності ефективної дози атмосферного повітря не виходили за межі коливань природного радіаційного фону.

Результати радіометрії проб опадів з атмосфери в м. Миколаєві наведено в таблиці 3. Загальна бета-активність опадів становила в середньому $12,1 \pm 2,4$ Бк/(місяць*м²). Вміст ¹³⁷Cs у цих опадах становив $1,2 \pm 0,4$ Бк/(місяць*м²).

Сумарна бета-активність опадів з атмосфери в м. Миколаєві становила в середньому $12,9 \pm 3,1$ Бк/(місяць*м²). Активність ¹³⁷Cs в опадах дорівнювала в середньому $1,4 \pm 0,3$ Бк/(місяць*м²).

За даними постійного радіаційного моніторингу опадів з атмосфери у м. Миколаєві загальна бета-активність опадів з атмосфери в 1990–2000 рр. варіювала в межах 11–25 Бк/(місяць*м²), а вміст ¹³⁷Cs не перевищував 2,2 Бк/(місяць*м²). З матеріалів оцінки нульового фону навколо ПАЕС (Томілін, 1980) маємо, що сумарна бета-активність атмосферного повітря в містах Южноукраїнськ, Вознесенськ коливалася в межах 0,200–0,700 Бк/л, активність ¹³⁷Cs атмосферного повітря не перевищувала 2,5 мБк/л, активність ⁹⁰Sr не перевищувала 2,0 мБк/л.

У таблиці 4 наведено дані, які вказують, що під час пересування в атмосферному просторі України радіоактивної хмари з ¹⁰⁶Ru у вересні 2017 р. (через аварійне його витікання на російському підприємстві з пере-

Таблиця 3

Результати радіометрії проб опадів з атмосфери в м. Миколаєві у 2023 і 2024 рр.

Експозиція	Загальна бета-активність, Бк/(місяць*м ²)		Вміст ¹³⁷ Cs, Бк/(місяць*м ²)	
	2023 р.	2024 р.	2023 р.	2024 р.
1 квартал	12,0 ± 3,0	12,4 ± 3,0	1,0 ± 0,2	1,1 ± 0,2
2 квартал	12,9 ± 3,5	13,1 ± 3,0	0,9 ± 0,1	1,0 ± 0,1
3 квартал	13,4 ± 2,6	13,9 ± 2,4	1,4 ± 0,2	1,2 ± 0,2
4 квартал	14,0 ± 3,0	14,1 ± 3,0	1,3 ± 0,3	1,2 ± 0,3

Таблиця 4

Результати радіометрії проб атмосферного повітря в населених пунктах Миколаївської області під час перенесення радіоактивної хмари з ^{106}Ru у вересні 2017 р.

Населений пункт	Вміст ^{106}Ru , Бк/м ³
м. Южноукраїнськ	$1,6 \cdot 10^{-2}$
с. Бузьке	$2,4 \cdot 10^{-2}$
смт Арбузинка	$2,9 \cdot 10^{-2}$
с. Костянтинівка	$2,3 \cdot 10^{-2}$
Середнє значення	$(2,3 \pm 0,3) \cdot 10^{-2}$

роблення ядерного палива «Маяк») у пробах атмосферного повітря та пробах атмосферних опадів реєструвався ^{106}Ru у підвищених кількостях. Рутеній-106 є бета-радіоактивним. Тому присутність його в атмосферному повітрі не могла призводити до підвищення рівня потужності ефективної / експозиційної дози, за показниками чого, як показано вище, здійснюється радіаційний контроль стану атмосферного повітря.

Результати радіометрії проб атмосферного повітря в цих населених пунктах вказали, що вміст ^{106}Ru значно підвищився, досягнувши величини $0,03 \text{ Бк/м}^3$. Цей β -випромінюючий радіонуклід в опадах з атмосфери було зафіксовано також у м. Южноукраїнську Миколаївської області та в прилеглих населених пунктах (табл. 5). Середнє значення вмісту ^{106}Ru в опадах з атмосфери становило $4,1 \pm 0,2 \text{ Бк/(місяць} \cdot \text{м}^2)$.

У м. Миколаєві такий контроль не проводився, тому інформація про вміст рутенію-106 в атмосферному повітрі й атмосферних опадах відсутня. Вважаємо, що цей факт є показовим щодо того, що радіоекологічний моніторинг атмосферного повітря під час підвищених ризиків виникнення

надзвичайної ситуації на АЕС, як це є під час військових дій, потрібно розширити до обов'язкової радіометрії проб опадів з атмосфери та, якщо є можливість, – радіометрії проб атмосферного повітря.

Висновки

У період військових дій у 2022–2024 рр. потужність ефективної дози атмосферного повітря в м. Миколаєві становила $0,12 \pm 0,01 \text{ мкЗв/год}$; у населених пунктах – постах контролю 30-кілометрової зони Південноукраїнської АЕС – $0,12 \pm 0,02 \text{ мкЗв/год}$ з розкидом від $0,09$ до $0,15 \text{ мкЗв/год}$. Цей розкид значень обумовлений геологічними особливостями Миколаївщини з виходом на поверхню в центрі та на півночі області кристалічних порід з підвищеним вмістом продуктів ділення уран-радієвого ряду. Порівняно з даними моніторингу цих територій під час зняття «нульового» фону району Південноукраїнської АЕС встановлено, що в м. Миколаєві та в населених пунктах Миколаївської області в період військових дій величини потужності ефективної дози атмосферного повітря не виходили за межі коливань природного радіаційного фону.

Загальна бета-активність опадів з атмосфери в м. Миколаєві у 2023 і 2024 рр. становила в середньому $12,9 \pm 3,1 \text{ Бк/(місяць} \cdot \text{м}^2)$. Вміст ^{137}Cs у цих опадах становив у середньому $1,4 \pm 0,3 \text{ Бк/(місяць} \cdot \text{м}^2)$, що відповідає природним рівням опадів з атмосфери.

Під час пересування в атмосферному просторі України радіоактивної хмари з ^{106}Ru у вересні 2017 р. середнє значення його вмісту в повітрі населених пунктів на півночі Миколаївської області становило $(2,3 \pm 0,3) \cdot 10^{-2} \text{ Бк/м}^3$. Загальна бета-активність опадів з атмосфери зросла до $13,9 \pm 1,8 \text{ Бк/(місяць} \cdot \text{м}^2)$, активність ^{106}Ru

Таблиця 5

Результати радіометрії проб опадів з атмосфери в окремих населених пунктах Миколаївської області під час перенесення радіоактивної хмари з ^{106}Ru у вересні 2017 р.

Населений пункт	Загальна бета-активність, Бк/(місяць*м ²)	Вміст ^{137}Cs , Бк/(місяць*м ²)	Вміст ^{106}Ru Бк/(місяць*м ²)
м. Южноукраїнськ	$13,8 \pm 3,0$	$1,1 \pm 0,2$	$4,1 \pm 0,2$
с. Бузьке	$12,9 \pm 3,5$	$0,9 \pm 0,1$	$3,9 \pm 0,1$
смт Арбузинка	$13,4 \pm 2,6$	$1,1 \pm 0,2$	$4,1 \pm 0,2$
с. Костянтинівка	$14,7 \pm 3,0$	$1,3 \pm 0,3$	$4,3 \pm 0,3$
Середнє значення	$13,9 \pm 1,8$	$1,0 \pm 0,2$	$4,1 \pm 0,2$

становила $4,1 \pm 0,2$ Бк/(місяць*м²). У пробах атмосферного повітря вміст ¹⁰⁶Ru дорівнював 0,03 Бк/м³. При цьому потужність ефективної дози атмосферного повітря не змінилася. Це вказує, що під час підвищених ризиків виникнення надзвичайної ситуації на АЕС, як це є під час військових дій, радіоекологічний моніторинг атмосферного повітря потрібно розширити до обов'язкової радіометрії проб опадів з атмосфери

та, якщо є можливість, – радіометрії проб атмосферного повітря.

Вимірювання потужності ефективної дози атмосферного повітря разом з радіометрією проб опадів з атмосфери й атмосферного повітря дасть змогу вчасно реагувати на можливі зміни радіонуклідного складу атмосферного повітря як від гамма-випромінюючих радіонуклідів, так і від чистих бета-випромінюючих радіонуклідів.

Список використаної літератури

- Барбашев С.В., Скалозубов С.І. Радіаційний вплив аварії на АЕС «Фукусіма-1» на навколишнє середовище і населення та оцінка радіаційних ризиків від запроектованих аварій на АЕС з ВВЕР-1000. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2012. № 1. С. 10–15. [https://doi.org/10.32918/nrs.2012.1\(53\).02](https://doi.org/10.32918/nrs.2012.1(53).02).
- Бібік Т., Борзенков В., Остапенко І. Захищеність ядерних установок та збройні конфлікти: уроки України. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2025. № 1 (105). С. 62–69. [https://doi.org/10.32918/nrs.2025.1\(105\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2025.1(105).07).
- Вітько В. Брудна бомба на ЗАЕС. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення* : збірник наукових статей. Харків, 2022. С. 92–99.
- Вітько В. Про можливі наслідки ядерної аварії на Запорізькій АЕС. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення* : збірник наукових статей. Харків. 2023. С. 85–91.
- Вітько В., Карташов В., Хабарова Г. Радіаційний вплив АЕС України на кордоні суміжних країн. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення* : збірник наукових статей. Харків, 2020а. С. 110–114.
- Вітько В.І., Карташов В.В., Хабарова Г.В. Оцінка транскордонного впливу викидів радіонуклідів АЕС України при нормальних та аварійних умовах експлуатації. *Проблеми охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки* : збірник наукових праць. Харків, 2020б. С. 92–98.
- Калда Г.С., Шевеля В.В., Рибалка К.А. Аналіз радіоактивного забруднення регіонів України та Польщі. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 6 (012). С. 59–65. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.271222.59.911>.
- Кустов М., Слепужніков Е., Ліповой В, Хмирьов І., Дадашов І., Бускін О. Процедура реалізації методу штучного осадження радіоактивних речовин з атмосфери. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2019. № 3 (83). С. 13–25. [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.3\(83\).02](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.3(83).02).
- Литвиненко А.С. Військово-технологічні та соціогуманітарні дослідження в Національній Академії наук України під час російсько-української війни. *Наука та наукознавство*. 2023. № 2 (120). С. 95–115. <https://doi.org/10.15407/sofs2023.02.003>.
- Новосьолов Г., Масько М. Про радіаційний вплив Запорізької та Южно-Української АЕС на навколишнє середовище. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2019. № 2 (14). С. 58–70. <https://doi.org/10.31717/2311-8253.19.1.8>.
- Томілін Ю. Радіаційна обстановка навколо Південноукраїнської атомної електростанції у передпусковий період (зняття нульового фону) : звіт НДР. Миколаїв, 1980. 147 с.
- Фаррахов О. Вражаючі фактори радіоактивного і хімічного забруднення атмосфери. Аналіз існуючих методів захисту населення. *Грааль науки*. 2022. № 17. С. 171–176. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.22.07.2022.030>.
- Chen B., Li Z., Yang Z. Nuclear Accident Emergency Response System: Radiation Field Estimation and Evacuation. *Sustainability*. 2022. No. 14. P. 5663. <https://doi.org/10.3390/su14095663>.
- Gellenoncourt A., Ayoub A., Haruko M. Wainwright. Optimizing radiation monitoring networks to improve emergency response strategies during nuclear power plant accidents. *Scientific Reports*. 2025. No. 15. P. 11914. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95571-0>.
- Iatsyshyn A.V., Ivaschenko T.G., Matvieieva I.V., Zakharchenko J.V., Lahoiko A.M. Development of recommendations for improving the radiation monitoring system of Ukraine. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2023. No. 1254 (2023). P. 012109. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012109>.
- Fujibuchi T., Iwaoka K., Shimada Y., Nabatame K. The Accident at Tokyo Electric Power Company Incorporated's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station: A Review of Radiation-Exposed Medical

Care and Waste (Secondary Publication). *Journal of Radiation Protection and Research*. 2024. Vol. 49 (2). P. 65–67. <https://doi.org/10.14407/jrpr.2023.00738>.

Povinec P., Katsumi H., Yutaka T. Fukushima Accident. 10 years after. 2021. 559 p. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03914-9>.

Shogo T., Takeshi I., Takayuki I., Masako K. Review of Articles Related to the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Published in the Japanese Journal of Health Physics: Opinion and Others (Secondary Publication). *Journal of Radiation Protection and Research*. 2025. Vol. 50 (1). P. 1–9. <https://doi.org/10.14407/jrpr.2023.00703>.

References

Barbashev, S.V. & Skalozubov, S.I. (2012). Radiatsiyni vplyv avarii na AES “Fukushima-1” na navkolyshnie seredovyshche i naselennia ta otsinka radiatsiinykh ryzykiv vid zaproektnykh avarii na AES z VVER-1000 [Radiation Impact of the Fukushima-1 Accident on the Environment and Population and Assessment of Radiation Risks from Beyond Design Basis Accidents at NPPs with VVER-1000]. *Yaderna ta radiatsiina bezpeka [Nuclear and radiation safety]*, 1, 10–15. [https://doi.org/10.32918/nrs.2012.1\(53\).02](https://doi.org/10.32918/nrs.2012.1(53).02) [in Ukrainian].

Bibik, T. Borzenkov, V. Ostapenko, I. (2025). Zakhyschenist yadernykh ustanovok ta zbroini konflikty: uroky Ukrainy [Security of Nuclear Facilities and Armed Conflicts: Lessons from Ukraine]. *Yaderna ta radiatsiina bezpeka [Nuclear and radiation safety]*, 1 (105), 62–69. [https://doi.org/10.32918/nrs.2025.1\(105\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2025.1(105).07) [in Ukrainian].

Vitko, V. (2022) Brudna bomba na ZAES [Dirty bomb at ZNPP]. *Zbirnyk naukovykh prats “Ekolohichna bezpeka: Problemy i shliakhy vyrishennia – 2022” [Collection of scientific works “Environmental safety: Problems and solutions – 2022”]*. Kharkiv, pp. 92–99 [in Ukrainian].

Vitko, V. (2023) Pro mozhyvi naslidky yadernoi avarii na Zaporizkii AES [On possible consequences of the nuclear accident at Zaporizhzhya NPP]. *Zbirnyk naukovykh prats “Ekolohichna bezpeka: Problemy i shliakhy vyrishennia – 2023” [Collection of scientific works “Environmental safety: Problems and solutions – 2023”]*. Kharkiv, pp. 85–91 [in Ukrainian].

Vitko, V. & Kartashov, V. & Khabarova, H. (2020). Radiatsiyni vplyv AES Ukrainy na kordoni sumizhnykh krain [Assessment of the transboundary impact of radionuclide emissions from Ukrainian NPPs under normal and emergency operating conditions] *Zbirnyk naukovykh prats “Ekolohichna bezpeka: Problemy i shliakhy vyrishennia – 2020” [Collection of scientific works “Environmental safety: Problems and solutions – 2020”]*. Kharkiv, pp. 110–114 [in Ukrainian].

Vitko, V., Kartashov, V. & Khabarova, H. (2020). Otsinka transkordonnoho vplyvu vykydiv radionuklidiv AES Ukrainy pry normalnykh ta avariinykh umovakh ekspluatatsii [Assessment of the transboundary impact of radionuclide emissions from Ukrainian NPPs under normal and emergency operating conditions]. *Zbirnyk naukovykh prats “Ekolohichna bezpeka: Problemy i shliakhy vyrishennia – 2020” [Collection of scientific works “Environmental safety: Problems and solutions – 2020”]*. Kharkiv, pp. 92–98 [in Ukrainian].

Kalda, H.S., Shevelia, V.V., Rybalka, K.A. (2022). Analiz radioaktyvnoho zabrudnennia rehioniv Ukrainy ta Polshchi [Analysis of radioactive contamination in the regions of Ukraine and Poland]. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury [Ukrainian Journal of Construction and Architecture]*, 6 (012), 59–65. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.271222.59.911> [in Ukrainian].

Kustov, M. (ed.) (2019). Protsedura realizatsii metodu shtuchnoho osadzhennia radioaktyvnykh rechovyh z atmosfery [The procedure for implementing the method of artificial deposition of radioactive substances from the atmosphere]. *Yaderna ta radiatsiina bezpeka [Nuclear and radiation safety]*, 3 (83), 13–25. [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.3\(83\).02](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.3(83).02) [in Ukrainian].

Lytvynenko, A.S. (2023). Viiskovo-tehnolohichni ta sotsiohumanitarni doslidzhennia v Natsionalnii Akademii nauk Ukrainy pid chas rosiisko-ukrainskoi viiny [Military-technological and socio-humanitarian research at the National Academy of Sciences of Ukraine during the Russian-Ukrainian war]. *Nauka ta naukoznastvo [Science and science studies]*, 2 (120), 95–115. <https://doi.org/10.15407/sofs2023.02.003> [in Ukrainian].

Novosolov, H., & Masko, M. (2019). Pro radiatsiyni vplyv Zaporizkoi ta Yuzhno-Ukrainskoi AES na navkolyshnie seredovyshche [On the radiation impact of Zaporizhzhia and South-Ukrainian NPPs on the environment]. *Yaderna enerhetyka ta dovkillia [Nuclear Power and the Environment]*, 2 (14), 58–70. <https://doi.org/10.31717/2311-8253.19.1.8> [in Ukrainian].

Tomilin, Yu. (1980). Radiatsiina obstanovka navkolo Pivdennoukrainskoi atomnoi elektrostantsii u peredpuskovyi period (zniattia nulovoho fonu): zvit NDR [Radiation situation around the South

Ukrainian Nuclear Power Plant in the pre-launch period (zero background): Report of the research work]. Mykolaiv, 47 p. [in Ukrainian].

Farrakhov, O. (2022). Vrazhaiuchi faktory radioaktyvnoho i khimichnoho zabrudnennia atmosfery. Analiz isnuuiuchykh metodiv zakhystu naselennia [The impact of radioactive and chemical contamination of the atmosphere. Analysis of existing methods of public protection.] *Hraal nauky [The grail of science]*, 17, 171–176. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.22.07.2022.030> [in Ukrainian].

Gellenoncourt, A., Ayoub, A., & Wainwright Haruko, M. (2025). Optimizing radiation monitoring networks to improve emergency response strategies during nuclear power plant accidents. *Scientific Reports*, 15, 11914. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95571-0> [in English].

Chen, B., Li, Z., & Yang, Z. (2022). Nuclear Accident Emergency Response System: Radiation Field Estimation and Evacuation. *Sustainability*, 14, 5663. <https://doi.org/10.3390/su14095663> [in English].

Iatsyshyn, A.V., Ivaschenko, T.G., Matvieieva, I.V., Zakharchenko, J.V., & Lahoiko, A.M. (2023). Development of recommendations for improving the radiation monitoring system of Ukraine. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1254 (2023), 012109. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012109> [in English].

Fujibuchi, T., Iwaoka, K., Shimada, Y., & Nabatame, K. (2024). The Accident at Tokyo Electric Power Company Incorporated's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station: A Review of Radiation-Exposed Medical Care and Waste (Secondary Publication). *Journal of Radiation Protection and Research*, 49 (2), 65–67. <https://doi.org/10.14407/jrpr.2023.00738> [in English].

Povinec, P., Katsumi, H., & Yutaka, T. (2021). Fukushima Accident. 10 years after. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03914-9> [in English].

Shogo, T., Takeshi, I., Takayuki, I., & Masako, K. (2025). Review of Articles Related to the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Published in the Japanese Journal of Health Physics: Opinion and Others (Secondary Publication). *Journal of Radiation Protection and Research*, 50 (1), 1–9. <https://doi.org/https://doi.org/10.14407/jrpr.2023.00703> [in English].

Отримано: 06.03.2025

Прийнято: 15.05.2025



УДК 502.13-047.44-024.84(045)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.35>

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ЯКОСТІ ДОВКІЛЛЯ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЕКОЛОГІЧНОГО УПРАВЛІННЯ

Н. Ю. Душечкіна¹

У статті проведено всебічний аналіз можливостей застосування системного аналізу як інструменту екологічного управління в контексті оцінювання якості довкілля. Обґрунтовано актуальність впровадження системного підходу для вирішення складних екологічних завдань у зв'язку зі зростанням рівня антропогенного навантаження, зміною клімату та глобальними екологічними викликами. Показано, що традиційних лінійних методів оцінювання довкілля замало для розуміння складних взаємозв'язків у соціо-еколого-економічних системах, що потребує інтеграції системного мислення із процесом ухвалення управлінських рішень. Визначено, що системний аналіз забезпечує структурування цілей, формалізацію альтернатив, прогнозування наслідків управлінських дій і оптимізацію рішень на основі міждисциплінарного узгодження параметрів.

У роботі проаналізовано ключові методи системного аналізу, зокрема побудову дерева цілей, метод експертних оцінок (зокрема, модифікований метод Дельфі), морфологічний аналіз, сценарне моделювання та багатокритеріальне оцінювання. Наведено результати застосування цих методів для розроблення моделей управління якістю водних ресурсів, оцінювання екологічних ризиків і просторового планування. Окрема увага приділена інтеграції системного аналізу з геоінформаційними системами, що дозволяє візуалізувати територіальний розподіл ризиків і підвищити точність стратегічних рішень у сфері природокористування. Підкреслено, що системний підхід дозволяє забезпечити комплексність оцінювання, урахувати просторово-часову динаміку змін, аналізувати сценарії розвитку та формувати адаптивні управлінські стратегії.

Установлено, що впровадження системного аналізу сприяє переходу до інтегрованої моделі екологічного управління, орієнтованої на стале використання природних ресурсів, запобігання екологічним ризикам і зміцнення екосистемної стійкості територій. Акцентовано на необхідності розвитку цифрових платформ системного аналізу, удосконалення механізмів експертного оцінювання та підготовки фахівців нового покоління для ефективного застосування даного підходу у практиці екологічного моніторингу, стратегічного планування і управління природними ресурсами.

Ключові слова: системний аналіз, якість довкілля, екологічне управління, експертні оцінки, сценарне моделювання, геоінформаційні системи, сталий розвиток.

¹ кандидат педагогічних наук, доцент,
доцент кафедри хімії та екології
(Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, м. Умань)
e-mail: nataxeta74@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4203-7122

SYSTEMATIC ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL QUALITY AS A TOOL FOR ENVIRONMENTAL MANAGEMENT

N. Yu. Dushechkina

The article provides a comprehensive analysis of the possibilities of applying systems analysis as a tool for environmental management in the context of assessing environmental quality.

The relevance of introducing a systems approach for solving complex environmental tasks is substantiated, considering the increasing anthropogenic pressure, climate change, and global ecological challenges. It is demonstrated that traditional linear methods of environmental assessment are insufficient for understanding complex interactions within socio-ecological-economic systems, necessitating the integration of systems thinking into the decision-making process. It is determined that systems analysis ensures the structuring of objectives, formalization of alternatives, forecasting of the consequences of management actions, and optimization of decisions based on interdisciplinary coordination of parameters.

The paper analyzes key systems analysis methods, including goal tree construction, expert evaluation methods (including the modified Delphi method), morphological analysis, scenario modeling, and multicriteria assessment. The results of applying these methods for developing models of water resource quality management, environmental risk assessment, and spatial planning are presented. Special attention is paid to the integration of systems analysis with geographic information systems, which allows the visualization of spatial risk distribution and enhances the accuracy of strategic decisions in the field of environmental management. It is emphasized that the systems approach provides comprehensive assessment capabilities, considers the spatiotemporal dynamics of changes, analyzes development scenarios, and supports the formation of adaptive management strategies.

It has been established that the implementation of systems analysis promotes the transition to an integrated model of environmental management aimed at the sustainable use of natural resources, prevention of environmental risks, and strengthening the ecosystem resilience of territories. The necessity of developing digital platforms for systems analysis, improving expert evaluation mechanisms, and training a new generation of specialists capable of effectively applying this approach in the practice of environmental monitoring, strategic planning, and natural resource management is emphasized.

Key words: systems analysis, environmental quality, environmental management, expert evaluation, scenario modeling, geographic information systems, sustainable development.

Вступ

У контексті глобальних екологічних змін, зростання антропогенного навантаження на довкілля та невинного виснаження природних ресурсів постає нагальна потреба в переосмисленні підходів до оцінювання якості навколишнього середовища й управління природними системами. Сучасна екологічна ситуація характеризується високим рівнем складності та невизначеності, що унеможливорює ефективне ухвалення рішень без використання науково обґрунтованих і структурованих методів аналізу.

Управлінські рішення у сфері природо-користування мають базуватися не лише на емпіричних даних чи досвіді, а й на комплексному розумінні системних зв'язків між природними, техногенними, соціальними й економічними чинниками. Тому дедалі більшої актуальності набуває системний аналіз – міждисциплінарний підхід, що забезпечує комплексне вивчення складних об'єктів і процесів, виявлення їхньої структури, динаміки та внутрішньої логіки функціонування. Такий підхід докладно аналі-

зується у працях з екологічного системного аналізу (Гандзюра, 2020).

Системний аналіз дозволяє формалізувати екологічні проблеми, виявити причинно-наслідкові зв'язки, побудувати прогностичні моделі й обґрунтувати альтернативні варіанти вирішення завдань з урахуванням ресурсних обмежень і можливих ризиків. Порівняно із традиційними підходами, він охоплює ширший спектр параметрів і взаємодій, що дозволяє ухвалювати більш зважені рішення. Застосування системного аналізу дозволяє подолати ці обмеження завдяки комплексному баченню проблем (Системний ..., 2021).

Актуальність даного дослідження полягає в необхідності систематизації знань про інструменти та методики системного аналізу в контексті оцінювання якості довкілля, а також у пошуку ефективних шляхів інтеграції цього підходу із практикою екологічного управління, зокрема для цілей моніторингу, стратегічного планування, адаптації до змін клімату та реалізації принципів сталого розвитку.

Упродовж останніх років у світовій і вітчизняній науці спостерігається зростання інтересу до застосування системного аналізу в екологічному моніторингу, управлінні природними ресурсами й ухваленні стратегічних рішень у сфері охорони довкілля. Зокрема, дослідження, проведені в рамках міждисциплінарних проєктів (Alex, 2021; Shang, 2025) демонструють ефективність інтегрованих підходів до аналізу складних соціо-еколого-економічних систем. Системний аналіз використовується для оцінювання стійкості екосистем, моделювання сценаріїв розвитку територій, оптимізації використання ресурсів з урахуванням екологічних обмежень (Боголюбов та ін., 2023).

Окрему увагу в науковому дискурсі останніх років приділено застосуванню системної динаміки, а також методів багатокритеріального ухвалення рішень (MCDA), які дозволяють комплексно оцінювати альтернативні стратегії природокористування. Такі дослідження підтверджують доцільність використання моделювання зворотних зв'язків між підсистемами довкілля для прогнозування наслідків екологічної політики (Messer et al., 2014; Velázquez, 2024). Окрім того, активно досліджується потенціал поєднання системного аналізу з геоінформаційними технологіями, що дозволяє не лише візуалізувати екологічні процеси, а й проводити просторово-часовий аналіз змін навколишнього середовища (Donkor et al., 2022).

Попри значний прогрес, існує низка невирішених питань, що стримують повноцінне впровадження системного аналізу у практику. Це, зокрема, брак уніфікованих моделей для регіонального екологічного управління, низький рівень цифровізації екологічного аналізу в публічному секторі, обмежені можливості адаптації методик до локального контексту, а також складнощі у трансформації якісних експертних суджень у кількісні параметри для моделювання. Важливою проблемою залишається також потреба в підвищенні екологічної обізнаності управлінців, здатних працювати з міждисциплінарними системами знань.

Отже, сучасні наукові публікації підтверджують потенціал системного аналізу як стратегічного інструменту сталого управління довкіллям, водночас акцентують на необхідності подальшої інтеграції цього підходу у практичну площину, з урахуванням цифрових технологій, локальних особливос-

тей і потреб адаптивного управління в умовах глобальних змін.

Метою дослідження є обґрунтування доцільності застосування системного аналізу для оцінювання якості довкілля та розроблення ефективних управлінських рішень у сфері екологічної безпеки.

Матеріал і методи

У дослідженні взяли участь 15 експертів, серед яких: 4 науковців із кафедр екології провідних українських ЗВО, 5 представників регіональних підрозділів Держекоінспекції, 3 представники екологічних ГО та 3 незалежні консультанти. Усі експерти мають щонайменше 10-річний досвід у сфері природоохоронної діяльності. Для обґрунтування застосованої методології використано напрацювання із системного аналізу (Добровольський і Безсонов, 2018; Cherkes, 2024), інтеграції ГІС та багатокритеріального оцінювання (Song et al., 2025; Bedo et al., 2025), а також сценарного аналізу екосистемних процесів (Liu & Wu, 2022).

Методологічною основою дослідження виступають принципи системного підходу, який дозволяє цілісно аналізувати складні соціо-еколого-економічні системи та виявляти внутрішні зв'язки між їхніми елементами. З урахуванням багатофакторності та високого рівня невизначеності сучасних екологічних викликів, системний аналіз застосовано як інструмент формалізації управлінських завдань, оцінювання альтернатив, моделювання наслідків рішень і ухвалення оптимальних стратегій у сфері природокористування. Основним матеріалом дослідження стали актуальні наукові публікації, аналітичні огляди, монографії та статті з міжнародних фахових журналів, як-от *International Journal of Environmental Studies*, *Ukrainian Journal of Ecology, Landscape and Urban Planning*, а також звіти міжнародних проєктів сталого розвитку, результати досліджень програм Horizon 2020, ресурси Європейського екологічного агентства (EEA), UNEP Data Explorer, національні бази моніторингу стану довкілля та приклади регіональних екологічних програм.

Для досягнення мети використано комплекс міждисциплінарних методів. Серед них – метод аналізу ієрархій (АНІ) для встановлення пріоритетності цілей управління довкіллям, метод побудови дерева цілей для структурування управлінських завдань, а також модифікований метод експертного оцінювання типу Дельфі, який застосову-

вався у форматі багаторівневої процедури опитування 15 фахівців. У дослідженні враховано також морфологічний аналіз для розроблення простору рішень щодо управління якістю водних об'єктів в урбанізованому середовищі, що дозволило сформулювати понад 150 комбінацій стратегій і здійснити їх подальше ранжування за критеріями екологічної доцільності, економічної ефективності, технічної реалізованості та соціального сприйняття.

З метою моделювання довготривалих наслідків управлінських рішень застосовано сценарне планування. Було розроблено умовні сценарії розвитку регіональної екологічної ситуації: інерційний, адаптивний та інноваційний, які оцінювалися за сукупністю індикаторів – рівень забруднення, вартість реалізації, часові горизонти впровадження та ризику. Логіко-структурне моделювання використовувалося для візуалізації процесу ухвалення рішень у формі блок-схем і причинно-наслідкових структур. Для поглиблення аналітичної частини до дослідження залучено геоінформаційні системи (GIS) у поєднанні з багатокритеріальним аналізом (MCDA), що дало змогу провести просторове ранжування варіантів рішень і оцінити розподіл екологічних загроз у межах умовної території.

Також у процесі дослідження використовувалися загальнонаукові методи – аналіз, синтез, порівняння, систематизація та структурно-функціональне узагальнення, які забезпечили інтеграцію результатів, отриманих із різних джерел, у єдину аналітичну модель. Дані, зібрані за допомогою експертних процедур і сценарного моделювання, оброблялись із використанням програмного забезпечення “QGIS”, “LibreOffice Draw” та “Microsoft Excel”. Загальна методологія побудована на поєднанні якісних і кількісних підходів до аналізу, що дозволило не лише сформулювати логіку екологічного управління, але й адаптувати результати до практичного використання в умовах обмеженості ресурсів і браку вихідних даних.

Результати

У процесі дослідження було здійснено системне застосування комплексу методів, що дали змогу побудувати багаторівневу модель оцінювання якості довкілля з позицій стратегічного екологічного управління. Одним із ключових результатів стала побудова дерева цілей, яке дозволило логічно структурувати екологічні завдання на трьох рівнях – стратегічному, тактичному й опе-

раційному. Стратегічні цілі, зокрема гарантування екологічної безпеки, досягнення стійкості екосистем і адаптація до кліматичних змін, було конкретизовано через підцілі, пов'язані з якістю повітря, води, ґрунтів, а також індикатори сталого природокористування. Структуризація завдань за допомогою дерева цілей дала змогу ідентифікувати вузлові точки ухвалення рішень і сфокусувати увагу на обмежених ресурсах, доступних для реалізації цілей у різних сценаріях.

Метод експертного оцінювання, реалізований через модифікований метод Дельфі, дав змогу отримати зважені й узгоджені судження від фахівців різних галузей. У дослідженні взяли участь 15 експертів, зокрема представники наукових установ, регіональних управлінь охорони природи, громадських організацій і незалежні консультанти. Дослідження проводилось у два тури. У першому турі було зібрано первинні оцінки важливості критеріїв екологічної ефективності, економічної доцільності, технічної реалізованості та соціальної підтримки. Після узагальнення результатів і надання експертам зворотного зв'язку, у другому турі досягнуто високого рівня конкордації оцінок ($W = 0,84$), що підтверджує узгодженість і надійність експертної думки. Узагальнені результати вказали на критичну важливість таких напрямів, як посилення екологічного моніторингу водних об'єктів, формування прозорої інформаційної бази даних, децентралізація управління ризиками та створення інтерактивних систем підтримки рішень на місцевому рівні.

Коефіцієнт конкордації Кендалла (W) у результаті другого туру експертного оцінювання становив 0,84, що свідчить про високий рівень узгодженості оцінок (Wang et al., 2021). Зведені результати демонструють розподіл середніх балів за чотирма ключовими критеріями. Найвищі інтегральні значення (0,88–0,92) отримали стратегії, які поєднували цифровий моніторинг, оновлення інфраструктури й активне залучення громади. Для візуалізації використовувались QGIS, LibreOffice Draw і MS Excel. Розрахунки сценарного моделювання базувалися на оцінці ризиків за п'ятьма показниками, що дозволило провести інтегроване оцінювання екологічних наслідків для кожного сценарію.

Морфологічний аналіз дозволив виявити можливі комбінації часткових управлінських рішень у сфері якості водних ресур-

сів. Модель охоплювала п'ять основних блоків: моніторинг, технічні засоби очищення, адміністративні інструменти, участь громадськості й інституційна підтримка. Загалом було змодельовано 162 можливі комбінації дій. За результатами багато-критеріального відбору 24 варіанти було відібрано для подальшого аналізу. Після їх оцінювання за допомогою MCDA 5 рішень набрали інтегральний бал понад 0,85 (з 1), що свідчить про їх високу потенційну ефективність. Наприклад, комбінація, що включала автоматизований моніторинг, поетапну модернізацію очисних споруд, інституційні стимули й освітні кампанії, виявилася оптимальною для умов середнього промислового навантаження.

Сценарне моделювання було реалізоване на прикладі умовної екосистеми в зоні змішаного землекористування з агропромисловими й урбанізованими територіями. Було побудовано три сценарії – інерційний, адаптивний та інноваційний. Інерційний сценарій передбачав збереження існуючих практик та нормативного підходу до управління. Адаптивний сценарій включав поетапне оновлення технологічної інфраструктури, зростання частки цифрових інструментів і зміцнення міжвідомчої взаємодії. Інноваційний сценарій базувався на повній цифровізації системи моніторингу, автоматизації зворотного зв'язку та реалізації принципів екосистемного управління. Результати сценарного моделювання показали, що в середньостроковій перспективі (5–7 років) адаптивний сценарій дозволяє знизити рівень екологічних ризиків на 18%, тоді як інноваційний забезпечує до 28% покращення, хоча потребує майже вдвічі більших початкових інвестицій.

Інтеграція системного аналізу з геоінформаційними технологіями дозволила створити просторову модель зони підвищеного ризику, у межах якої було здійснено візуалізацію джерел забруднення, потоків розповсюдження забруднюючих речовин і чутливих об'єктів – зокрема шкіл, водозаборів, рекреаційних зон. Було виявлено чітку залежність між щільністю забудови, наявністю транспортної інфраструктури й рівнем хімічного навантаження. З використанням функцій QGIS та MCDA побудовано карти пріоритетності втручання, які демонструють найбільш доцільні зони для екологічних інвестицій і природоохоронних заходів.

Логіко-структурне моделювання дозволило описати взаємозв'язки між елементами

системи ухвалення рішень, зокрема і блоки нормативного середовища, фінансового забезпечення, громадської підтримки та технічної реалізованості. Моделі були апробовані на прикладах типових управлінських рішень – наприклад, модернізації систем водоочищення або створення біофільтраційних полів. Установлено, що за врахування повного циклу впровадження (від ініціації до оцінювання результату) ефективність рішень значно зростає в разі присутності цифрових інструментів в обох ключових блоках: прогнозуванні й контролі.

У результаті узагальнення отриманих результатів можна дійти висновку, що системний аналіз не лише забезпечує структурну узгодженість екологічних рішень, а й дозволяє ефективно поєднувати кількісні та якісні параметри оцінювання. Його практичне застосування дозволяє сформулювати прозору, науково обґрунтовану платформу для підтримки стратегічного управління у сфері охорони довкілля, інтегруючи цифрові технології, експертний потенціал і міжгалузеву кооперацію. Такий підхід відкриває перспективи для створення адаптивних моделей локального та регіонального рівнів, здатних оперативно реагувати на зміни екологічного середовища та забезпечувати сталість природних систем навіть в умовах обмежених ресурсів і політичної турбулентності.

Обговорення

Отримані результати дослідження підтверджують ефективність системного аналізу як ключового інструменту підтримки екологічно вмотивованого ухвалення рішень в умовах складних і динамічних соціо-еколого-економічних систем. У сучасних умовах глобальної екологічної нестабільності, кліматичних змін, деградації природних ресурсів та зростання регіональних ризиків традиційні лінійні або ізольовані підходи до оцінювання довкілля виявляються неефективними. Саме тому системний аналіз, як показано в цьому дослідженні, забезпечує необхідну логічну послідовність і багаторівневу гнучкість, що дозволяє враховувати широкий спектр чинників і взаємозв'язків у межах інтегрованої екологічної політики.

Порівняння результатів із науковими напрацюваннями інших авторів засвідчує узгодженість підходів. Зокрема, дослідження (Добровольський, 2018) показало ефективність використання системної динаміки для моделювання взаємодії між підсистемами довкілля, що збігається з нашими результа-

тами щодо застосування сценарного моделювання та логіко-структурного аналізу. Аналогічно, (Гандзюра, 2020; Системний ..., 2021) у своїй багатофакторній моделі ландшафтного управління використовували морфологічний підхід для оцінювання ефективності екосистемних рішень, що підтверджує дієвість подібного інструментарію й у нашому випадку. Роботи (Bedo et al., 2025) демонструють, як інтеграція системного мислення із принципами сталого розвитку дає змогу створювати аналітичну базу для ухвалення рішень, що відповідає концепції нашого дослідження щодо побудови багаторівневої ієрархії цілей і моделей оптимізації дій.

На особливу увагу заслуговує синергія між системним аналізом і геоінформаційними технологіями. Як зазначають (Alex, 2023; Cherkes, 2024), поєднання GIS і багатокритеріального аналізу дозволяє значно підвищити точність і просторову обґрунтованість екологічного планування. Наші результати підтверджують це твердження на прикладі побудови карт екологічних ризиків і локалізації територій із пріоритетною потребою у втручанні. Така інтеграція також посилює можливості для візуалізації сценаріїв, оперативної інтерпретації результатів і формування рекомендацій для місцевих органів влади та громадськості.

Значення системного підходу не обмежується лише сферою технічного або математичного моделювання. Його потенціал полягає у трансформації управлінської культури – від реагування до прогнозування, від ізольованого управління до координації міжсекторальних дій. Ієрархічна декомпозиція цілей, яку було реалізовано в нашому дослідженні, є потужним інструментом узгодження політик, визначення точок конфлікту інтересів і створення простору для компромісних стратегій. В умовах воєнного стану та відновлення економіки України такі інструменти можуть забезпечити довготривалу стабільність у природокористуванні, без жертвування водночас екологічною якістю.

Варто також визнати наявність низки обмежень. По-перше, застосування системного аналізу потребує високого рівня міждисциплінарної підготовки фахівців, що нині не є системно підтриманим в освітніх програмах. По-друге, брак якісних, регулярних і відкритих екологічних даних обмежує можливості кількісного моделювання, знижує достовірність прогнозів. По-третє,

інституційна інерція і слабка взаємодія між суб'єктами екологічного управління можуть стримувати імплементацію навіть найобґрунтованіших рішень.

Важливим аспектом, що потребує додаткового дослідження, є формалізація якісних експертних оцінок, які часто використовуються як основа у сценарному моделюванні. Також перспективним напрямом є розроблення інтерактивних цифрових платформ, які б поєднували бази екологічних даних, інструменти системного аналізу та механізми комунікації зі стейкхолдерами. Такий підхід забезпечить оперативне оновлення інформації, розширення участі зацікавлених сторін і адаптивність рішень відповідно до мінливих умов середовища.

Отже, результати цього дослідження не лише підтверджують наукову і практичну цінність системного аналізу як інструменту екологічного управління, а й створюють підґрунтя для формування нових підходів до планування, моніторингу й оцінювання ефективності природоохоронних рішень у складному середовищі сучасних викликів.

Висновки

Результати проведеного дослідження підтвердили, що системний аналіз є потужним міждисциплінарним інструментом для оцінювання якості довкілля та ухвалення науково обґрунтованих рішень у сфері екологічного управління. Його застосування дозволяє не лише формалізувати складні екологічні проблеми, а й створити структуровану модель цілей, альтернатив та індикаторів, що забезпечує узгодженість між стратегічними, тактичними й операційними рівнями природоохоронної діяльності.

У процесі дослідження доведено ефективність методів дерева цілей, морфологічного аналізу, сценарного моделювання, експертних оцінок і багатокритеріального аналізу у вирішенні завдань, пов'язаних з управлінням якістю водного середовища, просторовим плануванням і оцінюванням екологічних ризиків. Поєднання системного підходу з геоінформаційними технологіями дозволило забезпечити візуалізацію і адаптацію рішень до конкретного територіального контексту, а використання логіко-структурного моделювання сприяло побудові цілісних алгоритмів ухвалення рішень з урахуванням нормативних, фінансових і соціальних параметрів.

Системний аналіз, як продемонстровано в роботі, сприяє переходу від фрагментарного до комплексного бачення екологічного

управління, дає змогу враховувати вплив різноманітних чинників, здійснювати інтеграцію кількісних і якісних методів, підвищувати прозорість і підзвітність ухвалених рішень. Його впровадження є необхідною умовою формування ефективної екологічної політики на національному та регіональному рівнях, особливо в умовах децентралізації та обмежених ресурсів.

Практична цінність отриманих результатів полягає в можливості їх адаптації для створення аналітичних модулів екологічного моніторингу, розроблення стратегій сталого природокористування, інтеграції екологічних міркувань у місцеві плани соціально-економічного розвитку. З огляду на сучасні виклики, зокрема зміну клімату, техногенні ризики, урбанізацію та посилення воєнних

загроз, системний підхід може забезпечити сталу основу для формування адаптивної екологічної політики.

Перспективи подальших досліджень убагачуються у створенні цифрових платформ на основі системного аналізу, які об'єднуюватимуть дані, аналітику, моделювання та інструменти залучення зацікавлених сторін. Також доцільним є подальше вдосконалення формалізації експертних суджень, розроблення локалізованих моделей для різних типів природокористування та інтеграція системного аналізу в освітні й управлінські практики. Це дозволить перейти до якісно нової моделі екологічного управління, що базується на науковому прогнозуванні, технологічній підтримці й участі громади.

Список використаної літератури

Боголюбов В.М, Сальнікова А.В., Ракоїд О.О. Екологічний моніторинг : навчальний посібник. Київ : НУБіПУ, 2023. 200 с.

Гандзюра В.П. Системний аналіз якості навколишнього середовища : навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Київ, 2020. 180 с.

Добровольський В.В., Безсонов Є.М. Системний аналіз якості навколишнього середовища : навчальний посібник. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2018. 164 с.

Системний аналіз якості навколишнього середовища : навчальний посібник для студентів спеціальності 101 Екологія / О.В. Медведєва та ін. Кропивницький, 2021. 80 с.

Alex M.V. Evaluating the enhanced remote sensing ecological index: Unraveling the dynamics and influences on spatiotemporal changes in ecological environment quality. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2023. № 13. P. 4–6. https://doi.org/10.15421/2023_489.

Bedo D., Mekuriaw A., Bantider A. Climate change impacts on ecosystem services in the wetlands of Abijata Shala Lakes National Park, Ethiopia. *International Journal of Environmental Studies*. 2025. Vol. 82. Is. 2. P. 807–824. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2444261>.

Cherkes B. Climate resilient, green and low carbon built environment. *International Journal of Environmental Studies*. 2024. № 81 (1). <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2314844>.

Donkor M., Kong Y., Kwaku Manu E., Henry Ntarmah A., Appiah-Twum F. Economic Growth and Environmental Quality: Analysis of Government Expenditure and the Causal Effect. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2022. № 19 (17). P. 10629. <https://doi.org/10.3390/ijerph191710629>.

Liu L., Wu J. Scenario analysis in urban ecosystem services research: Progress, prospects, and implications for urban planning and management. *Landscape and Urban Planning*. 2022. Vol. 224. P. 104433. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104433>.

Messer L.C., Jagai J.S., Rappazzo K.M., & Lobdell D.T. Construction of an environmental quality index for public health research. *Environmental Health*. 2014. № 13 (1). P. 39. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-13-39>.

Shang B. The interplay of land use change and ecosystem service sustainability. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2025. № 15. P. 1–3. https://doi.org/10.15421/2025_592.

Song J., Huang L., Wang X. A study on the correlation between green economy development and foreign investment based on regression analysis. *International Journal of Environmental Studies*. 2025. Vol. 82. Iss. 2. P. 859–870. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2444848>.

Velázquez D. Conservation strategies: Emerging trends and ongoing challenges in species ecological niche modeling. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2024. № 14. P. 28–30. https://doi.org/10.15421/2024_588.

References

Boholiubov, V.M, Salnikova, A.V., & Rakoid, O.O. (2023). *Ekolohichniy monitorynh: navchalnyi posibnyk* [Environmental Monitoring: A Training Manual]. Kyiv: NUBiPU, 200 s. [in Ukrainian].

Handziura, V.P. (2020). Systemnyi analiz yakosti navkolyshnoho seredovyshcha: Navchalnyi posibnyk dlia studentiv vyshchych navchalnykh zakladiv [Systematic analysis of environmental quality]. Kyiv. 180 p. [in Ukrainian].

Dobrovolskyi, V.V., & Bezsonov, Ye.M. (2018). Systemnyi analiz yakosti navkolyshnoho seredovyshcha: navch. posib [Systematic analysis of environmental quality]. Mykolaiv: Vyd-vo ChNU im. Petra Mohyly. 164 p. [in Ukrainian].

Medvedieva, O., Kropivnyi, V., Mirzak, T., & Nemyrovskiy, Ya. (2021). Systemnyi analiz yakosti navkolyshnoho seredovyshcha. Navchalnyi posibnyk dlia studentiv spetsialnosti 101 Ekolohiia [Systematic analysis of environmental quality]. Kropyvnytskyi. 80 p. [in Ukrainian].

Alex, M.V. (2023). Evaluating the enhanced remote sensing ecological index: Unraveling the dynamics and influences on spatiotemporal changes in ecological environment quality. *Ukrainian Journal of Ecology*, 13, 4–6. https://doi.org/10.15421/2023_489 [in English].

Cherkes, B. (2024). Climate resilient, green and low carbon built environment. *International Journal of Environmental Studies*. 81 (1). <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2314844> [in English].

Bedo, D., Mekuriaw, A., & Bantider, A. (2025). Climate change impacts on ecosystem services in the wetlands of Abijata Shala Lakes National Park, Ethiopia. *International Journal of Environmental Studies*, Vol. 82, Is. 2, 807–824. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2444261> [in English].

Donkor, M., Kong, Y., Kwaku Manu, E., Henry Ntarmah, A., & Appiah-Twum, F. (2022). Economic Growth and Environmental Quality: Analysis of Government Expenditure and the Causal Effect. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 19 (17), 10629. <https://doi.org/10.3390/ijerph191710629> [in English].

Liu, L., Wu, J. (2022). Scenario analysis in urban ecosystem services research: Progress, prospects, and implications for urban planning and management. *Landscape and Urban Planning*, Vol. 224, 104433. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104433> [in English].

Messer, L.C., Jagai, J.S., Rappazzo, K.M., & Lobdell, D.T. (2014). Construction of an environmental quality index for public health research. *Environmental Health*, 13 (1), 39. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-13-39> [in English].

Shang, B. (2025). The interplay of land use change and ecosystem service sustainability. *Ukrainian Journal of Ecology*, 15, 1–3. https://doi.org/10.15421/2025_592 [in English].

Song, J., Huang, L. & Wang, X. (2025). A study on the correlation between green economy development and foreign investment based on regression analysis. *International Journal of Environmental Studies*, Volume 82, Issue 2, 859–870. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2444848> [in English].

Velázquez, D. (2024). Conservation strategies: Emerging trends and ongoing challenges in species ecological niche modeling. *Ukrainian Journal of Ecology*. 14, 28–30. https://doi.org/10.15421/2024_588 [in English].

Отримано: 23.04.2025

Прийнято: 15.05.2025



УДК 332.1:338.242

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.36>

РЕАЛІЗАЦІЯ ЦІЛЕЙ СТАЛОГО РОЗВИТКУ В АКЦЕНТІ НА РЕГІОНАЛЬНІ ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ

Ю. О. Карпенко¹, В. О. Свердлов²

Реалізація Цілей сталого розвитку (ЦСР) в Україні, зокрема на регіональному рівні, є важливим етапом упровадження глобальних екологічних стандартів у національну політику. Ця стратегія передбачає досягнення 17 цілей, затверджених на Саміті Організації Об'єднаних Націй зі сталого розвитку у 2015 році, з урахуванням національних особливостей і пріоритетів. Особливу увагу приділено екологічним аспектам, оскільки регіони України стикаються з різноманітними екологічними проблемами, що потребують комплексного підходу до їх вирішення.

Однією з основних екологічних проблем є забруднення довкілля, зокрема водних ресурсів, ґрунтів і атмосфери. За даними Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, понад 32% звалищ і полігонів твердих побутових відходів потребують паспортизації, 5% перевантажені обсягами понад установлені нормативи, а 13% не відповідають нормам експлуатації за параметрами екологічної безпеки. Щорічно виявляється майже 33 тисячі несанкціонованих звалищ, що мають площу понад 1 тисячу гектарів. Ці чинники сприяють забрудненню водних ресурсів, зокрема у водах Азовського моря, що негативно впливає на екологічний стан регіону й економічну ситуацію, зокрема на туристичну галузь.

Іншою суттєвою проблемою є деградація земель, зокрема ерозія ґрунтів, яка охоплює 57% території України. Щорічно змивається понад 500 мільйонів тон ґрунту, що призводить до значних економічних збитків. Це потребує впровадження ефективних заходів з охорони земельних ресурсів і збереження біорозмаїття.

Для ефективної реалізації Цілей сталого розвитку на регіональному рівні необхідно розробити та впровадити стратегії сталого розвитку, які враховують специфіку кожного регіону. Ці стратегії мають базуватися на принципах сталості, екологічної безпеки та соціальної справедливості. Важливим аспектом є залучення місцевих громад до процесу планування та реалізації екологічних проектів, що сприятиме підвищенню ефективності та стійкості цих ініціатив.

Отже, реалізація Цілей сталого розвитку з акцентом на регіональні екологічні проблеми є ключовим напрямом забезпечення сталого розвитку України. Це потребує комплексного підходу, інтеграції екологічних, економічних і соціальних аспектів, а також активної участі місцевих громад

¹ кандидат біологічних наук, доцент,
завідувач кафедри екології, географії та природокористування
(Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка, м. Чернігів)
e-mail: yuch2011@i.ua
ORCID: 0000-0002-1703-8473

² доктор філософії з біології,
старший лаборант кафедри біології
(Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка, м. Чернігів)
e-mail: vovasv8989@ukr.net
ORCID: 0000-0002-4079-0831

у процесі ухвалення рішень. Лише за умови ефективної реалізації цих стратегій можна досягти сталого розвитку на регіональному рівні та гарантувати екологічну безпеку для майбутніх поколінь.

Ключові слова: стратегічне планування, охорона навколишнього середовища, сталий розвиток, екологічна політика.

IMPLEMENTATION OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS WITH AN EMPHASIS ON REGIONAL ENVIRONMENTAL PROBLEMS

Yu. O. Karpenko, V. O. Sverdlov

The implementation of the Sustainable Development Goals (SDGs) in Ukraine, particularly at the regional level, is an important stage in the integration of global environmental standards into national policy. This strategy envisages the achievement of the 17 SDGs approved at the UN Summit on Sustainable Development in 2015, taking into account national characteristics and priorities. Particular attention is paid to environmental aspects, as the regions of Ukraine face various environmental problems that require an integrated approach to their solution. One of the main environmental problems is environmental pollution, in particular water resources, soil and atmosphere. According to the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine, more than 32% of landfills and landfills for solid household waste require certification, 5% are overloaded with volumes exceeding the established standards, and 13% do not meet the operating standards for environmental safety parameters. Almost 33 thousand unauthorized landfills are detected annually, covering an area of over 1 thousand hectares. These factors contribute to the pollution of water resources, in particular in the waters of the Sea of Azov, which negatively affects the ecological state of the region and the economic situation, in particular the tourism industry. Another significant problem is land degradation, in particular soil erosion, which covers 57% of the territory of Ukraine. More than 500 million tons of soil are washed away annually, which leads to significant economic losses. This requires the implementation of effective measures to protect land resources and preserve biodiversity. For the effective implementation of the SDGs at the regional level, it is necessary to develop and implement sustainable development strategies that take into account the specifics of each region. These strategies should be based on the principles of sustainability, environmental safety and social justice. An important aspect is the involvement of local communities in the process of planning and implementing environmental projects, which will contribute to increasing the effectiveness and sustainability of these initiatives. Thus, the implementation of the SDGs with an emphasis on regional environmental problems is a key direction for ensuring sustainable development in Ukraine. This requires a comprehensive approach, integration of environmental, economic and social aspects, as well as active participation of local communities in the decision-making process. Only with the effective implementation of these strategies can sustainable development be achieved at the regional level and ensure environmental security for future generations.

Key words: strategic planning, environmental protection, sustainable development, environmental policy.

Вступ

Євроінтеграційні та євроатлантичні прагнення України, зокрема й наміри приєднатися до Європейського зеленого курсу, а також активна діяльність на міжнародному та державному рівнях, ініціативи, спрямовані на екологізацію всіх сфер життєдіяльності, мають бути системно реалізовані на рівні територіальних громад регіонів нашої держави через відповідні стратегії розвитку та місцеві екологічні програми.

Резолюція Генеральної Асамблеї ООН «Перетворення нашого світу: Порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 р.» визначає нову стратегію дій, спрямовану на забезпечення глобального переходу до

сталого розвитку. У рамках історичного Саміту ООН у вересні 2015 р. держави – члени Організації Об'єднаних Націй ухвалили Глобальні цілі сталого розвитку на період 2016–2030 рр., які замінили Цілі розвитку тисячоліття, чинні до 2015 р. Відтоді набули чинності 17 Цілей сталого розвитку (далі – ЦСР) і 169 відповідних завдань (Цілі ..., 2017).

Процес інтеграції України зі світовою системою забезпечення сталого розвитку сприяв розробленню регіональних стратегій, що враховують 17 ЦСР, ухвалених на Саміті ООН зі сталого розвитку у 2015 р. (The Millennium ..., 2015) і адаптованих відповідно до національних умов (Цілі ..., 2017).

Ця стратегічна ініціатива вимагає від місцевих органів влади застосування комплексного підходу до середньострокового планування, що забезпечує одночасну реалізацію завдань у взаємопов'язаних сферах «економіка – суспільство – природа». Окрім того, постає необхідність оптимізації пріоритетів регіонального розвитку шляхом скорочення їх переліку для концентрації фінансових ресурсів на ключових напрямках, які забезпечать системний і довгостроковий вплив на розвиток регіонів і національної економіки загалом (Pakulin et al., 2018).

У Національній доповіді «Цілі сталого розвитку: Україна», представлений Кабінетом Міністрів України 15 вересня 2017 р., були окреслені основні індикатори та результати адаптації глобальних цілей з урахуванням особливостей національного контексту розвитку (Цілі ..., 2017). На рівні регіонів України формується довгострокове стратегічне планування, що ґрунтується на цільових програмах і схемах територіального розвитку регіонів (Pakulin et al., 2019). Отже, регіональні програми визнаються ключовим інструментом стратегічного управління, оскільки вони сприяють досягненню визначених цілей розвитку (Tsyupkin et al., 2018).

Стратегічне планування, як одна з основних функцій управління, охоплює процес формулювання цілей територіального розвитку, пошук шляхів їх реалізації з урахуванням виконавців, часових рамок і джерел фінансування. Основою державного стратегічного планування в Україні є програмно-цільовий підхід, який передбачає визначення основних соціально-економічних пріоритетів і формування заходів для їх досягнення.

Особливе місце серед стратегічних інструментів управління належить екологічним стратегіям і відповідним документам планування економічної та соціальної діяльності, що є невід'ємною частиною як національних, так і регіональних програм. Екологічні проблеми зазвичай мають довгостроковий характер, що зумовлює необхідність застосування стратегічних підходів до їх вирішення. Розроблення екологічних стратегій передбачає формулювання екологічного місця регіону, визначення перспектив його розвитку, установлення пріоритетів і завдань, деталізацію цих завдань у спеціалізованих програмах охорони довкілля, механізми їх реалізації, а також аналіз результатів впровадження.

Визначення екологічної ролі регіону базується на аналізі внутрішніх і зовнішніх чин-

ників, які впливають на його екологічний стан, виявленні сильних і слабких сторін природоохоронної діяльності, а також можливостей і загроз для гарантування екологічної безпеки регіональної економіки й умов проживання населення (Забезпечення ..., 2014).

Мета дослідження – проведення аналізу реалізації цілей сталого розвитку крізь призму регіональних екологічних проблем, визначення основних викликів і можливостей у їх вирішенні, а також розроблення рекомендацій щодо вдосконалення підходів до інтеграції екологічних аспектів у стратегічне планування регіонального розвитку.

Матеріал і методи

У дослідженні використано комплексний підхід, що поєднує кількісні та якісні методи аналізу. Основними джерелами інформації стали нормативно-правові акти, державні та регіональні стратегії сталого розвитку, екологічні програми, а також статистичні дані, зібрані в офіційних джерелах, як-от Державна служба статистики України, Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, і регіональні департаменти екології та природних ресурсів (Бречко і Кривокульська, 2023).

Методи дослідження включають:

- *аналіз документів* – для оцінювання нормативної бази, стратегій, програм і звітності в контексті реалізації екологічних цілей сталого розвитку;
- *статистичний аналіз* – для вивчення динаміки екологічних показників у регіонах України, виявлення тенденцій, проблем і пріоритетів у їх вирішенні;
- *SWOT-аналіз* – для оцінювання сильних і слабких сторін, можливостей і загроз щодо вирішення екологічних проблем у різних регіонах України;
- *порівняльний аналіз* – для зіставлення ефективності реалізації екологічних цілей у різних регіонах;
- *експертні опитування* – залучення фахівців у сфері екології, сталого розвитку та регіонального планування для формування рекомендацій (Ліп'яніна-Гончаренко, 2024).

Додатково застосовано міждисциплінарний підхід, що об'єднує знання із природничих, соціальних і економічних наук для глибокого аналізу проблем. Результати дослідження спрямовані на формування рекомендацій щодо вдосконалення механізмів реалізації екологічного складника сталого розвитку в Україні.

Результати та їх обговорення

Основою для розроблення стратегій розвитку до 2030 р. є всебічний аналіз поточного стану регіону й ідентифікація найбільш актуальних проблем, що характеризують його натеper. Одним із ключових індикаторів такого аналізу виступає інтегральний регіональний індекс людського розвитку (далі – РІАР), який урахує рівень матеріального добробуту, соціальні аспекти й екологічні умови життя населення (Державна ..., 2013).

Із загальної кількості 17 цілей сталого розвитку, визначених на національному рівні, деякі завдання передбачають координацію зусиль усіх макроекономічних суб'єктів незалежно від регіональної специфіки. До

них належать: зменшення наслідків зміни клімату, підтримання миру, забезпечення справедливості та розвитку сильних інститутів, досягнення гендерної рівності, а також сприяння партнерству для досягнення сталого розвитку (Про затвердження ..., 2020).

Інші 13 цілей реалізуються переважно в межах регіонального рівня, що підкреслює важливість визначення стратегічних пріоритетів для місцевих органів влади. У таблиці 1 наведено авторське бачення пріоритетності цілей сталого розвитку з урахуванням рейтингування регіонів на основі аналізу регіонального індексу людського розвитку.

Важливим аспектом розглядається забезпечення якісної, усеохоплюючої

Таблиця 1

Соціальні цілі розвитку регіонів України на період до 2030 р.

Області*	Складник РІАР з найнижчим рейтингом регіону за 3 роки	Найпроблемніший індикатор у визначеному складнику РІАР	Відповідна ЦСР
1	2	3	4
Вінницька	Комфортне життя	Основною проблемою в цій сфері є неналежне оснащення сільських будинків централізованими системами каналізації, водовідведення, газопостачання або електроплитами.	Ціль 6. Чиста вода та належні санітарні умови.
	Гідна праця	Фіксується високий відсоток працівників, чия заробітна плата нижча за 1,5 прожиткового мінімуму.	Ціль 8. Гідна праця та економічне зростання.
Волинська	Добробут	Найбільш уразливою є сфера добробуту населення. Ключовим негативним показником виявлено обмежену купівельну спроможність, тобто кількість мінімальних продуктових кошиків, які доступні для придбання на середньодушовий дохід.	Ціль 1. Подолання бідності.
Дніпропетровська	Відтворення населення	Головною проблемою виявлено негативні демографічні тенденції. Зокрема йдеться про низьку ймовірність досягнення особами віку від 20 до 65 років.	Ціль 3. Міцне здоров'я і благополуччя.
Житомирська	Добробут	Сфера добробуту домогосподарств демонструє низьку забезпеченість товарами тривалого користування (телевізор, холодильник, пральна машина).	Ціль 1. Подолання бідності. Ціль 9. Промисловість, інновації та інфраструктура.
Закарпатська	Освіта	У сфері освіти спостерігається низька частка населення віком 25 років і більше, яке має освітній рівень не нижче за базову вищу освіту.	Ціль 4. Якісна освіта.

Продовження таблиці 1

1	2	3	4
Запорізька	Комфортне життя	Найнижчі показники спостерігаються у сфері комфортного життя, зокрема за інтегральним показником стану довкілля.	Ціль 15. Захист і відновлення екосистем суші. Ціль 14. Збереження морських ресурсів.
Івано-Франківська	Освіта	Освітній складник найменш розвинений, зокрема через низьке охоплення дітей віком 3–5 років дошкільною освітою.	Ціль 4. Якісна освіта.
Київська	Соціальне становище	Соціальне становище визначається високими показниками первинної захворюваності на алкоголізм, наркотичні залежності та психічні розлади.	Ціль 3. Міцне здоров'я і благополуччя. Ціль 12. Відповідальне споживання та виробництво.
Кіровоградська	Соціальне середовище	У контексті соціального середовища проблемною залишається висока кількість дітей-сиріт і дітей, позбавлених батьківського піклування (на 100 тис. дітей віком 0–17 років).	Ціль 3. Міцне здоров'я і благополуччя.
Львівська	Добробут	Сфера добробуту визначається кількістю продуктивних кошиків, доступних для придбання на середньодушовий дохід.	Ціль 1. Подолання бідності.
Миколаївська	Соціальне середовище	Соціальне середовище характеризується високою часткою дітей-сиріт і дітей, позбавлених батьківського піклування.	Ціль 3. Міцне здоров'я і благополуччя.
Одеська	Соціальне середовище	Найпроблемнішою є соціальна складова частина, зокрема високий рівень первинної захворюваності на активну форму туберкульозу (на 100 тис. населення).	Ціль 3. Міцне здоров'я і благополуччя.
Полтавська	Комфортне життя	У категорії комфортного життя фіксується низький рівень забезпеченості житлом у міських поселеннях (загальна площа на одну особу).	Ціль 11. Сталий розвиток міст і громад.
Рівненська	Добробут	Добробут визначається високим рівнем бідності за відносним критерієм (питома вага населення, чії витрати не перевищують 75% медіанного рівня).	Ціль 1. Подолання бідності.
Сумська	Комфортне життя	У комфорті життя ключовою проблемою є низький відсоток житлових будинків у сільській місцевості, обладнаних централізованим газопостачанням або електроплитами.	Ціль 6. Чиста вода та належні санітарні умови. Ціль 7. Доступна та чиста енергія.
Тернопільська	Гідна праця	Сфера праці визначається низьким рівнем зайнятості населення (відсоток зайнятих осіб віком 18–65 років).	Ціль 8. Гідна праця та економічне зростання.
Харківська	Відтворення населення	Демографічна ситуація є проблемною через низьке значення сумарного коефіцієнта народжуваності.	Ціль 3. Міцне здоров'я і благополуччя.

Закінчення таблиці 1

1	2	3	4
Херсонська	Добробут	У сфері добробуту відзначається низька частка домогосподарств, які здійснювали заощадження або купували нерухомість.	Ціль 10. Скорочення нерівності.
Хмельницька	Комфортне життя	Комфортне життя визначається обсягом послуг, реалізованих населенню (на одну особу).	Ціль 10. Скорочення нерівності.
Черкаська	Гідна праця	Гідна праця залишається проблемною сферою через значну частку працівників, які виконують обов'язки в умовах, що не відповідають санітарно-гігієнічним нормам.	Ціль 6. Чиста вода та належні санітарні умови.
Чернівецька	Освіта	Освітній складник демонструє низький середній бал результатів зовнішнього незалежного оцінювання.	Ціль 4. Якісна освіта.
Чернігівська	Відтворення населення	Найбільш критичним є демографічний показник – сумарний коефіцієнт народжуваності.	Ціль 3. Міцне здоров'я і благополуччя.

Примітка. * Інформація наведена для областей за винятком Автономної Республіки Крим, Донецької та Луганської області.

освіти та заохочення до навчання протягом життя як ключовий аспект розвитку (Ціль 4: “Quality Education: Ensure inclusive and equitable quality education and promote lifelong learning opportunities for all”). Особлива увага приділяється освіті для сталого розвитку, що передбачена в завданні 4.7: «До 2030 р. забезпечити здобуття учнями знань і навичок, необхідних для сприяння сталому розвитку, включно з освітою у сферах сталого способу життя, прав людини, гендерної рівності, культури миру та ненасильства, світового громадянства, цінності культурного розмаїття та внеску культури у сталий розвиток» (Цілі ..., 2017).

У Національній доповіді (2017 р.) щодо п. 4 зазначено основні досягнення української освіти, проте серед завдань та індикаторів відсутні конкретні згадки про освіту для сталого розвитку. Водночас у рекомендаціях підкреслюється важливість оновлення змісту навчальних програм шляхом інтеграції компонентів сталого розвитку, раціонального споживання тощо.

В Україні були впроваджені деякі ініціативи в межах освіти для сталого розвитку, зокрема, у низці навчальних закладів викладався предмет «Уроки для сталого розвитку». Однак останні зміни в системі шкільної освіти не зберегли цю ідею.

Для досягнення Цілі 15 «Життя на суші» (Life on Land), яка передбачає захист, відновлення та сприяння сталому використанню наземних екосистем, сталий менеджмент лісів, боротьбу з опустелюванням, припинення деградації земель і втрати біорозмаїття, було визначено низку завдань. Проте в Національній доповіді (2017 р.) відображено лише індикатори до завдань 15.1–15.4, тоді як аспекти, пов'язані зі стримуванням деградації природних середовищ існування, припиненням втрати біорозмаїття та збереженням видів, що перебувають під загрозою зникнення (завдання 15.5), залишилися поза увагою.

Одним із ключових аспектів досягнення Цілі 15 є заходи щодо запобігання проникненню чужорідних інвазійних видів і зменшення їхнього впливу на наземні й водні екосистеми, а також заходи із запобігання скороченню чисельності або знищенню пріоритетних видів (завдання 15.8). Проте ці питання також не відображені в Національній доповіді (2017 р.) та рекомендаціях щодо їх реалізації (Цілі ..., 2017).

Інвазійні чужорідні види є однією з п'яти основних загроз для біорозмаїття, оскільки вони спричиняють витіснення аборигенних видів, зникнення популяцій охоронюваних видів, зменшення видового розмаїття та порушення екологічної рівноваги. Деякі

з них також негативно впливають на здоров'я людини, що призводить до значних економічних втрат, тому гостро постає питання контролю за їх локалітетами та статусами в різних регіонах нашої держави.

Особливу небезпеку становлять види рослин, які активно поширюються останніми роками, зокрема карантинні види, як-от *Ambrosia artemisiifolia* L. та *Heracleum sosnowskyi* Manden, а також види, боротьба з якими потребує значних ресурсів, наприклад, *Reynoutria japonica* (Houtt.) Ronse Decr. Інші види, що загрожують природним екосистемам, включають *Erigeron canadensis* L., *Cyclachaena xanthiifolia* (Nutt.) Fresen., *Echinocystis lobata* (F. Michx.) Torr. & A., *Geranium sibiricum* L., *Impatiens glandulifera* Royle, *Sisymbrium volgense* Bieb. ex Fourn., *Xanthium strumarium* L.

Для ефективного вирішення цієї проблеми необхідно терміново створити Національний перелік чужорідних видів біоти, що негативно впливають на біорозмаїття, розробити національну стратегію боротьби з інвазійними видами, з урахуванням відповідного європейського досвіду (Про затвердження..., 2024).

Завдання 15.1 «Забезпечення збереження, відновлення та сталого використання наземних і внутрішніх прісноводних екосистем» є ключовим аспектом досягнення Цілі 15. У Національній доповіді (2017 р.) зазначено, що різні форми господарської діяльності суттєво змінюють природні середовища існування живих організмів. Зокрема, будівництво гідроелектростанцій, створення водосховищ, осушувальні роботи в Поліссі й обводнення степових територій на півдні України призвели до значних змін гідрологічного режиму. Як наслідок, прісноводні екосистеми зазнали втрат у біорозмаїтті, подібно до наземних.

Водозалежні екосистеми характеризуються значною різноманітністю, зокрема й динамічні системи, що варіюють у розмірах від малих до великих лентичних і лотичних екосистем. Ці середовища підтримують угруповання та види, які мають природоохоронний статус. У зв'язку з посиленням антропогенного впливу та глобальними змінами збалансування потреб людства у воді з екологічними потребами водних і наземних екосистем стає однією з найважливіших екологічних проблем, особливо з урахуванням зростання чисельності населення.

Захист і відновлення водозалежних екосистем, зокрема й гір, лісів, водно-болотних

угідь, річок, водоносних горизонтів і озер, є також частиною завдань Цілі 6 (зокрема, завдання 6.6). У Національній доповіді (2017 р.) ці аспекти частково відображені в рекомендаціях до Цілі 15, які передбачають створення репрезентативної та ефективно керованої системи природоохоронних територій, а також активізацію заходів зі збереження, відновлення та сталого використання наземних і внутрішніх прісноводних екосистем, зокрема й степових і водно-болотних угідь.

Завдання 15.3 передбачає відновлення деградованих земель і ґрунтів із застосуванням інноваційних технологій. Оскільки процеси деградації земель мають локальний характер і розвиваються в різних регіонах, заходи з їх відновлення спрямовані на підтримання нейтрального балансу земельних ресурсів і запобігання подальшому погіршенню їхнього стану. Розвиток промисловості, сільського та водного господарства, урбанізація, видобуток корисних копалин та інші види господарської діяльності спричиняють забруднення і фізичну трансформацію середовищ існування живих організмів, що зазначено в Національній доповіді «Цілі Сталого Розвитку: Україна» (2017 р.).

Окрему увагу варто приділити Цілі 16 «Мир, справедливість та сильні інститути», яка спрямована на сприяння мирним та інклюзивним суспільствам для сталого розвитку, забезпечення доступу до правосуддя для всіх і створення ефективних, підзвітних та інклюзивних інституцій на всіх рівнях. Сталий розвиток неможливий без миру, як і мир неможливий без сталого розвитку. Поточна війна в Україні спричиняє не лише значні людські втрати, але й катастрофічні екологічні наслідки, що є другою за масштабами воєнно-техногенною екологічною катастрофою після Чорнобильської аварії.

Бойові дії на значній території України завдають значної шкоди навколишньому середовищу. Використання важкого озброєння та проведення активних воєнних операцій супроводжуються руйнуванням гідротехнічних споруд, дамб і гідроелектростанцій, а також забрудненням, спричиненим руйнуванням складів і сховищ радіоактивних і токсичних речовин. Це призводить до підтоплення, утворення провалів і зсувів.

Особливу небезпеку становить забруднення водних ресурсів, зокрема річки Сіверський Донець, яка є однією з найбільших річок України та забезпечує питною водою східні регіони. Забруднення

або пошкодження каналу цієї річки може спричинити дефіцит питної води в багатьох населених пунктах. Потенційними джерелами забруднення є скиди токсичних речовин унаслідок аварій на підприємствах, пошкодження міських очисних споруд, а також забруднення вірусами чи мікроорганізмами внаслідок терористичних актів, що може призвести до критичного санітарно-гігієнічного стану.

Воєнні дії також спричиняють забруднення ґрунтів небезпечними речовинами, як-от важкі метали, сполуки сірки, аміаку, фосфору, а також хімічними відходами підприємств, серед яких є сильнотоксичні отруйні речовини. Вогнем пошкоджено значні площі лісів, степів, орних земель і об'єктів природно-заповідного фонду. На території природно-заповідних об'єктів збудовано окопи й інші фортифікаційні споруди. Розриви боєприпасів залишають після себе пошкоджені різним чином ґрунти, забруднені хімічними речовинами та засмічені уламками металу. Наслідки хімічного забруднення та руйнувань, спричинених обстрілами, матимуть довготривалий вплив, що триватиме десятиліттями.

У Національній доповіді зазначено лише Завдання 16.8, яке стосується відновлення територій, постраждалих від конфлікту. Варто зауважити, що природне відновлення земельних ресурсів, забруднених важкими металами, потребує десятків років, а рекультивація таких земель можлива лише за умов мирного часу (Цілі ..., 2017).

Отже, орієнтація стратегій розвитку регіонів на досягнення пріоритетних цілей сталого розвитку, специфічних для кожної території, сприятиме вдосконаленню середньострокового планування. Це дозволить створити науково обґрунтовану структуру «дерева цілей», що відображає соціально-економічний розвиток регіонів нашої держави в довгостроковій перспективі до 2030 р.. Такий підхід забезпечить ефективну інтеграцію регіональних особливос-

тей із загальнонаціональною стратегією сталого розвитку.

Висновки

Україна має різноманітні екологічні проблеми з вираженою регіональною специфікою. З огляду на те, що Україна адаптувала 17 глобальних Цілей сталого розвитку до національного контексту, їх упровадження на регіональному рівні залишається обмеженим. Багато регіонів не мають чітких стратегій або планів дій щодо досягнення зазначених цілей, що ускладнює моніторинг і оцінювання прогресу. Це свідчить про необхідність посилення координації між національними та регіональними органами влади у сфері сталого розвитку. На сучасному етапі важливі розроблення та впровадження системи моніторингу, яка б забезпечувала регулярне оновлення даних і їх доступність для всіх зацікавлених сторін.

Для реалізації екологічних ініціатив на регіональному рівні необхідно розробити механізми залучення інвестицій, зокрема через створення спеціальних фондів, пільгових кредитів і грантів для підтримки екологічних проєктів. Також досягнення Цілей сталого розвитку потребує тісної співпраці між різними секторами – урядом, бізнесом, громадськими організаціями, освітніми та науковими установами. Така співпраця дозволяє об'єднати ресурси, знання та досвід для вирішення комплексних екологічних проблем і забезпечення сталого розвитку регіонів.

Загалом, реалізація Цілей сталого розвитку в Україні з акцентом на регіональні екологічні проблеми потребує системного підходу, що передбачає адаптацію національної стратегії до місцевих умов, удосконалення системи моніторингу, залучення громадськості, забезпечення фінансової підтримки та міжсекторальну співпрацю. Тільки за умови комплексного підходу й активної участі всіх зацікавлених сторін можна досягти сталого розвитку та гарантувати екологічну безпеку для сьогодення і майбутніх поколінь.

Список використаної літератури

Бречко О., Кривокульська Н. Вплив цифрової трансформації на досягнення екологічних цілей сталого розвитку України. *Modeling the development of the economic systems*. 2023. № 4. С. 201–209. <https://doi.org/10.31891/mdes/2023-10-28>.

Державна політика сталого розвитку на засадах «зеленої економіки»: аналітична записка. *Національний інститут стратегічних досліджень* [Електронний ресурс]. URL: https://niss.gov.ua/doslidzhennya/nacionalna-bezpeka/derzhavna-politika-stalogo-rozvitku-na-zasadakh-zelenoi-ekonomiki?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 17.04.2025).

Забезпечення сталого розвитку міст як складова соціально-економічної модернізації регіонів України : аналітична записка. Комітет з питань екологічної політики та природокористування [Електронний ресурс]. URL: https://komekolog.rada.gov.ua/documents/good_info/good_info/analit_mater/73371.html?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 17.04.2025).

Ліп'яніна-Гончаренко Х. Методологія аналізу соціально-економічних даних територіальних громад. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. Т. 337. № 3 (2). С. 446–450. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-67>.

Про затвердження Державної стратегії регіонального розвитку на 2021–2027 р. : постанова Кабінету Міністрів України від 05.08.2020 р. № 695, станом на 13.08.2025 р. [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020-п#Text> (дата звернення: 16.04.2025).

Про затвердження Методичних рекомендацій щодо оцінки наявного і потенційного впливу (ризиків) інвазійних чужорідних видів. *Парламент України* : офіційний вебпортал [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0290926-24#Text> (дата звернення: 16.04.2025).

Цілі сталого розвитку: Україна : Національна доповідь. Міністерство економіки України. 2017 [Електронний ресурс]. URL: <https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=6f446a44-9bba-41b0-8642-8db3593e696e&title=NatsionalnaDopovid-tsiliStalogoRozvitku-Ukraina-> (дата звернення: 16.04.2025).

Цілі сталого розвитку : Національна доповідь. 2017. UNDP [Електронний ресурс]. URL: <https://www.undp.org/uk/ukraine/publications/tsili-staloho-rozvytku-natsionalna-dopovid-2017> (дата звернення: 18.04.2025).

Pakulin S.L., Feklistova I.S., Pakulina A.A., Pakulina H.S. Resource support of sustainable socio-economic regional development. Theoretical achievements for practice : proceedings of the XXVIII International scientific conference, USA, Morrisville, Sept 22, 2018. Morrisville : Lulu Press. P. 29–35.

Pakulin S.L., Feklistova I.S., Pakulina A.A., Pakulina H.S. Strengthening public-private partnership as a factor of sustainable regional development. *Universum View 13* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, м. Рівне, 19 січня 2019 р. Вінниця: ТОВ «Нілан-Атд», 2019. С. 11–17.

The Millennium Development Goals Report. New York : United Nations, 2015. 75 p.

Tsyppkin Y.A., Pakulin S.L., Feklistova I.S. The implementation of the strategy of sustainable development of the social sphere. *Innovations in modern world* : proceedings of the VII International scientific conference, United Kingdom, London, June 1, 2018. London : SI Universum. P. 18–24.

References

Brechko, O., & Kryvokul'sjka, N. (2023). Vplyv cyfrovoji transformaciji na dosjaghnennja ekologichnykh cilej stalogo rozvytku Ukrainy [The impact of digital transformation on achieving Ukraine's environmental sustainable development goals]. *Modeling the development of the economic systems*, (4), 201–209. <https://doi.org/10.31891/mdes/2023-10-28> [in Ukrainian].

Nacional'nyj instytut strategichnykh doslidzhenj. (2013). *Derzhavna polityka stalogo rozvytku na zasadakh "zelenoji ekonomiky"* [State policy of sustainable development based on the principles of "green economy"]. [Electronic resource] URL: https://niss.gov.ua/doslidzhennya/nacionalna-bezpeka/derzhavna-politika-stalogo-rozvitku-na-zasadakh-zelenoi-ekonomiki?utm_source=chatgpt.com (access date 17.04.2025) [in Ukrainian].

Komitet z pytanj ekologichnoji polityky ta pryrodokorystuvannja (2014). *Zabezpechennja stalogo rozvytku mist jak skladova socialjno-ekonomichnoji modernizaciji rehioniv Ukrainy* [Ensuring sustainable urban development as a component of socio-economic modernization of Ukrainian regions]. [Electronic resource] URL: https://komekolog.rada.gov.ua/documents/good_info/good_info/analit_mater/73371.html?utm_source=chatgpt.com (access date 17.04.2025) [in Ukrainian].

Lip'janina-Ghoncharenko, Kh. (2024). Metodologhija analizu socialjno-ekonomichnykh danykh terytorial'nykh ghromad [Methodology for analyzing socio-economic data of territorial communities]. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky* [Bulletin of Khmelnytskyi National University. Series: Technical Sciences], 337 (3 (2)), 446–450. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-67> [in Ukrainian].

Ministerstvo ekonomiky Ukrainy (2017). Nacional'na dopovidj "Cili stalogo rozvytku: Ukraina" [National report "Sustainable Development Goals: Ukraine"]. [Electronic resource] URL: <https://>

me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=6f446a44-9bba-41b0-8642-8db3593e696e&title=NatsionalnaDopovid-tsiliStalogoRozvitku-Ukraina- (access date 16.04.2025) [in Ukrainian].

Kabinet Ministriv Ukrainy (2020). *Pro zatverdzhennja Derzhavnoji strateghiji rehionaljnogho rozvytku na 2021–2027 rr.: postanova № 695 vid 05.08.2020 (stanom na 13.03.2025) [On approval of the State Strategy for Regional Development for 2021–2027: resolution № 695 of August 5, 2020 (as of March 13, 2025)]*. [Electronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020-p#Text> (access date 16.04.2025) [in Ukrainian].

Verkhovna Rada Ukrainy (2024). *Pro zatverdzhennja Metodychnykh rekomendacij shhodo ocinky najavnogho i potencijnogho vplyvu (ryzyki) invazijnykh chuzhoridnykh vydiv [On approval of Methodological recommendations for assessing the current and potential impact (risks) of invasive alien species]*. [Electronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0290926-24#Text> (access date 16.04.2025) [in Ukrainian].

Tsili staloho rozvytku: Natsionalna dopovid 2017 [Sustainable Development Goals: National Report 2017] UNDP. [Electronic resource] URL: <https://www.undp.org/uk/ukraine/publications/tsili-staloho-rozvytku-natsionalna-dopovid-201> (access date 18.04.2025) [in Ukrainian].

Pakulin, S.L., Feklistova, I.S., Pakulina, A.A., & Pakulina, H.S. (2018). Resource support of sustainable socio-economic regional development. In Proceedings of the XXVIII International scientific conference “Theoretical achievements for practice”, 29–35. Morrisville: Lulu Press [in English].

Pakulin, S.L., Feklistova, I.S., Pakulina, A.A., & Pakulina, H.S. (2019). Strengthening public-private partnership as a factor of sustainable regional development. In *Universum View 13: Materials of the international scientific-practical conference* (Ukraine, Rivne, January 19, 2019), 11–17. Vinnytsia: Nilan-LTD [in English].

United Nations (2015). The Millennium Development Goals Report. New York: United Nations [in English].

Tsyppkin, Y.A., Pakulin, S.L., & Feklistova, I.S. (2018). The implementation of the strategy of sustainable development of the social sphere. In Proceedings of the VII International scientific conference “Innovations in modern world”, 18–24. London: SI Universum [in English].

Отримано: 25.04.2025
Прийнято: 15.05.2025



УДК 504.064

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.37>

АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ФІТОТОКСИЧНОСТІ ЧОРНОЗЕМНОГО ҐРУНТУ ЗАБРУДНЕНОГО НАФТОПРОДУКТАМИ

О. В. Коляда¹, Г. В. Коробкова², В. П. Коляда³

У статті розглянуто проблему забруднення ґрунтів нафтопродуктами та їхній вплив на фітотоксичність ґрунтів, що є ключовим показником для оцінювання екологічного стану природних середовищ. Фітотоксичність ґрунту визначається як його здатність негативно впливати на проростання насіння та розвиток рослин, що є важливим індикатором забруднення. Проведено аналіз впливу різних концентрацій нафтопродуктів на схожість насіння редису та морфологічні показники тест-рослин (довжину паростків). Експериментальні дані демонструють чітку залежність між рівнем забруднення ґрунту й інгибуванням проростання насіння. Найвищий показник схожості насіння (76,0%) спостерігався на чистому ґрунті, тоді як за збільшення концентрації забруднювача до 10 г/кг цей показник знижувався до 30,0%. У разі надзвичайно високого забруднення (100 г/кг) проростання рослин не відбувалося взагалі. Аналогічна тенденція спостерігалась і для біометричних показників. Зокрема, на 5-ту добу на чистому ґрунті довжина паростків у середньому становила 3,5 см, але суттєво зменшувалась (до 1,5 см) на варіанті з концентрацією забруднення 10 г/кг ґрунту. За високого рівня забруднення проростання рослин не відбувалося зовсім. На 10-ту добу спостерігали поступове зниження довжини паростків зі збільшенням концентрації забруднювача – із 7,8 см на чистому ґрунті до 6,6 см у разі забруднення на рівні 1,0 ГДК. Суттєве зниження даного параметра порівняно із чистим ґрунтом спостерігали за збільшення концентрації забруднення до 10,0 та 100,0 ГДК. Фітотоксичність ґрунту, визначена за довжиною паростків, підвищувалась з ростом тест-рослин і залежала від концентрації забруд-

¹ кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри екології та біотехнологій у рослинництві
(Державний біотехнологічний університет, м. Харків)
e-mail: olyakolyadapovh@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3727-5492

² кандидат географічних наук,
старший викладач кафедри екології та біотехнологій у рослинництві
(Державний біотехнологічний університет, м. Харків)
e-mail: korobkovaann@gmail.com
ORCID: 0000-0002-0246-8585

³ кандидат сільськогосподарських наук,
старший дослідник, завідувач лабораторії охорони ґрунтів від ерозії та дистанційних методів дослідження
(Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського, м. Харків»)
e-mail: koliadavalerii@gmail.com
ORCID: 0000-0003-2682-5687

нення. За мінімального забруднення ґрунту (0,5–1,0 ГДК) рівень фітотоксичності становив 6,6–15,0%, залежно від варіанту та доби спостереження. За концентрації 10,0 г/кг фітотоксичність досягала 35,0%, а за 100,0 г/кг – критичного рівня (77,0–100,0%), що робить ґрунт практично непридатним для нормального розвитку рослин. Отримані результати підкреслюють високу чутливість рослин до наявності нафтопродуктів у ґрунті. Нафтопродукти можуть порушувати водний режим ґрунту, знижувати доступність поживних елементів і створювати токсичні умови, які пригнічують клітинне дихання та поділ клітин під час сходів. Окрім того, нафтопродукти утворюють щільну масляну плівку на поверхні ґрунту, що перешкоджає доступу кисню до насіння. Токсичні речовини можуть проникати всередину клітин, порушувати функціонування ферментних систем, необхідних для проростання та подальшого росту.

Ключові слова: ґрунт, нафтопродукти, фітотоксичність, тест-рослини, забруднення.

ANALYSIS AND MODELING OF PHYTOTOXICITY OF CHERNOZEM SOIL CONTAMINATED WITH OIL PRODUCTS

O. V. Koliada, G. V. Korobkova, V. P. Koliada

The article discusses the problem of soil pollution by oil products and their impact on soil phytotoxicity, which is a key indicator for assessing the ecological state of natural environments. Soil phytotoxicity is defined as its ability to negatively affect seed germination and plant development, which is an important indicator of pollution. The influence of different concentrations of petroleum products on radish seed germination and morphological parameters of test plants, such as sprout length, was analyzed. The experimental data demonstrate a clear relationship between the level of soil contamination and inhibition of seed germination. The highest rate of seed germination (76,0%) was observed on clean soil, while with an increase in the concentration of the pollutant to 10 g/kg, this figure decreased to 30,0%. At extremely high contamination (100 g/kg), no plant germination occurred at all. A similar trend was observed for biometric indicators. In particular, on the seventh day on clean soil, the length of the sprouts averaged 3,5 cm, and significantly decreased to 1,5 cm in the variant with a pollution concentration of 10 g/kg of soil. At a high level of pollution, plant germination did not occur at all. On day 10, a gradual decrease in the length of the sprouts was observed with an increase in the concentration of the pollutant – from 7,8 cm on clean soil to 6,6 cm with pollution at 1,0 MPC. A significant decrease in this parameter compared to clean soil was observed with an increase in the concentration of pollution to 10,0 MPC and 100 MPC. The phytotoxicity of the soil, determined by length of sprouts, increased as the test plants grew and depended on the concentration of pollution. With minimal soil contamination (0,5–1,0 MPC), the level of phytotoxicity was 6,6–15,0%, depending on the variant and day of observation. At a concentration of 10,0 g/kg, the phytotoxicity reached 35,0%, and at 100,0 g/kg – a critical level (77,0–100,0%), which makes the soil practically unsuitable for normal plant development. The results emphasize the high sensitivity of plants to the presence of oil products in the soil. Oil products can disrupt the water regime of the soil, reduce the availability of nutrients and create toxic conditions that inhibit cellular respiration and cell division during germination. In addition, petroleum products form a dense oil film on the soil surface, which prevents oxygen from reaching the seeds. Toxic substances can penetrate into the cells, disrupting the functioning of enzyme systems necessary for germination and further growth.

Key words: soil, oil products, phytotoxicity, test plants, pollution.

Вступ

Забруднення ґрунту залишками агрохімікатів, засобів захисту рослин і нафтопродуктами лишається серйозною екологічною проблемою для значної частини сільськогосподарських угідь нашої країни (Круглов та ін., 2019; Балюк та ін., 2024). Це спричиняє значні зміни фізико-хімічних і біологічних властивостей ґрунтового покриву та знижує його родючість (Жолобак та ін., 2018).

Забруднювальні речовини, що потрапляють у ґрунт, можуть накопичуватися або

переноситися за межі ґрунтового профілю, водночас негативно впливати на структуру ґрунту, його вологутримувальну здатність, кислотність і мікробіологічну активність (Taheri et al., 2018; Крайнюков та ін., 2020). Так, нафтопродукти змінюють кислотно-лужний баланс ґрунту, спричиняють підкислення внаслідок хімічних реакцій окислення вуглеводнів. Зміни рН впливають на розчинність і доступність поживних елементів для рослин: у кислих умовах знижується доступність кальцію, магнію і калію, що значно знижує родючість ґрунту. Водночас

зростає токсичність важких металів, як-от кадмій і свинець, які можуть бути зв'язані з нафтопродуктами (Боднарчук та ін., 2017).

Нафтопродукти чинять значний токсичний вплив на біологічні процеси у ґрунті, зокрема на мікроорганізми, які є ключовими для підтримки родючості та біологічної активності ґрунту (Шевчик-Костюк та ін., 2022). Вуглеводні з нафтопродуктів, які проникають у ґрунт, мають шкідливий вплив на популяцію бактерій, які виконують важливі функції, зокрема азотфіксацію та розкладання органічних речовин (Krainiukov et al., 2022). Натепер забруднення ґрунту нафтопродуктами є серйозною екологічною проблемою, яка посилюється зростанням виробництва, транспортування, зберігання і використання нафти та нафтопродуктів. Потрапляння нафтопродуктів у ґрунт, спричинене аваріями, витокami із трубопроводів, технологічними процесами або необережним поводженням, негативно впливає на навколишнє середовище і становить значні ризики для екосистеми (Balseiro-Romero et al., 2018). Загалом, забруднення нафтопродуктами значно погіршує якість ґрунту, знижує його екологічні функції та становить серйозну загрозу для навколишнього середовища.

З огляду на серйозну небезпеку забруднення ґрунтів нафтопродуктами (Agamuthu et al., 2010), зокрема й унаслідок мілітарного впливу (Диняк і Кошлякова, 2023; Мандрик і Лукинчук, 2023), наші дослідження були спрямовані на моделювання та оцінювання фітотоксичності штучно забрудненого нафтопродуктами ґрунту. Аналіз фітотоксичності забруднених ґрунтів є дуже важливим, адже саме рослини першими реагують на забруднення, саме їхній стан може бути маркером рівня токсичності ґрунту. Такі дослідження дозволяють оцінити вплив забруднення на ріст, розвиток і продуктивність рослин, а також визначити критичну концентрацію нафтопродуктів, за якої ґрунт втрачає здатність підтримувати життєдіяльність рослин (Haider et al., 2021).

Дослідженнями О.Ф. Бабаджанової, Ю.Г. Сукач, Р.Ю. Сукач підтверджено, що інгібування ростових процесів у рослин крес-салату перебуває у прямій залежності від рівня забруднення ґрунту дизельним паливом. Зокрема, у разі забруднення ґрунту 5,0% дизельного палива спостерігалася зменшення висоти стебел у 50 разів порівняно з контролем (Бабаджанова та ін., 2017). У дослідженнях Л.А. Колеснікової та

М.П. Федюшко вивчено вплив сирої нафти на структурні характеристики листової пластинки проростків ярої пшениці, що розвивалися на ґрунті зі штучно створеним нафтовим забрудненням. Виявлено негативний фітотоксичний ефект, який спричиняє дегенеративні зміни, зокрема атрофію та руйнування клітин хлоренхіми, що може завершитися загибеллю проростків тест-рослин (Колеснікова і Федюшко, 2015).

Матеріал і методи

Для проведення досліджень зразки ґрунту було відібрано з орного шару робочої ділянки на території ННВЦ «Дослідне поле Докучаєвське» Державного біотехнологічного університету. Ґрунтовий покрив даного поля представлений чорноземом типовим слабозмитим малогумусним важкосуглинистим на карбонатному лесі, який характеризується такими агрохімічними показниками: рН сольової витяжки – 6,4–7,0; загальний вміст гумусу в орному шарі – 4,8–5,0%; вміст рухомих форм фосфору – 8–10, калію – 9–11 мг/100 г ґрунту. Окрім того, даний ґрунт характеризується високою біологічною активністю, має агрономічно цінну зернисто-грудкувату структуру, виділяється добрими фізико-механічними властивостями та значними запасами поживних речовин у доступній для рослин формі.

Для реалізації запланованих досліджень зразки чорноземного ґрунту було висушено, просіяно та поміщено в посудини ємністю 200 мл. Для забруднення ґрунту використовували дизельне паливо. Як контроль використовували чистий ґрунт, що не піддавався впливу забруднення. Відповідно до «Гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних речовин у ґрунті» (затверджених наказом Міністерства охорони здоров'я України № 1595 від 14 липня 2020 р.), ГДК нафтопродуктів у ґрунтах становить 1 000 мг/кг. З урахуванням цього, для моделювання забруднення ґрунтів було додано відповідну кількість нафтопродуктів і передбачено такі схеми дослідження: 1 – чистий ґрунт без додавання забруднювача; 2 – 0,5 ГДК (0,5 г/кг); 3 – 1,0 ГДК (1,0 г/кг); 4 – 10,0 ГДК (10,0 г /кг); 5 – 100,0 ГДК (100,0 г/ кг); 6 – 1 000,0 ГДК (1 000,0 г/кг). Кратність повторення кожного варіанту – триразова.

Як тест-культуру застосовували редьку посівну (*Raphanus sativus* L.). Пророщування насіння проводили відповідно до ДСТУ ISO 11269-1 та ДСТУ ISO 11269-2. Ріст рослин

відбувався в термостаті за температури 23,0 °C упродовж 10 діб. Після завершення досліду проводили заміри довжини паростків рослин, розраховували середні значення показників по повтореннях для кожного із досліджуваних варіантів. Статистичний аналіз даних проводили за допомогою програми JMP.

Фітотоксичний ефект дії нафтопродуктів на тест-рослини розраховували за формулою 1:

$$\Phi = \frac{L - L_x}{L} * 100, \% \quad (1)$$

де L – морфометричні характеристики тест-рослин на контрольних варіантах без забруднення;

L_x – морфометричні характеристики тест-рослин на досліджуваних зразках ґрунту.

Оцінювання рівня фітотоксичності забрудненого ґрунту визначали відповідно до шкали, наведеної в таблиці 1.

Таблиця 1

Шкала оцінювання рівня пригнічення
ростових процесів рослин під впливом
забруднення

Рівень пригнічення ростових процесів (ФЕ, %)	Рівень токсичності
0–20	Токсичність відсутня або її рівень слабкий
20,1–40,0	Середній
40,1–60,0	Вищий за середній
60,1–80,0	Високий
80,1–100,0	Максимальний

Результати

Фітотоксичність ґрунту – це загальний показник, який використовується для оці-

нювання впливу забруднення ґрунту на розвиток високорослих рослин. Присутність токсичних речовин у ґрунті може негативно впливати на ріст рослин і проростання насіння. Основним показником токсичності ґрунту є спостереження за динамікою проростання насіння і кількістю пророслих рослин протягом визначеного часу. Тестування рослин є методом виявлення токсичності як у ґрунті, так і у водному середовищі. Рослини реагують на хімічний вплив зменшенням інтенсивності проростання насіння, довжини паростків, що робить їх ефективним індикатором токсичності.

Метод тестування рослин полягає в оцінюванні чутливості рослин до хімічних речовин, які впливають на їхній ріст і морфологічні ознаки. Основними вимогами до цього методу є чіткість, простота та зручність проведення експерименту, відтворюваність і надійність результатів, економічність і об'єктивність (Романюк та ін., 2016).

Нами було оцінено вплив різних рівнів забруднення ґрунту на схожість насіння редису. Результати експерименту показали, що схожість насіння редису змінюється залежно від рівня забруднення ґрунту: за збільшення концентрації забруднювача відбувається інгібування проростання насіння тест-рослин. Найвищий показник схожості насіння спостерігали на варіанті без забруднення – 76,0%, зі збільшенням концентрації поллютанта рівень схожості тест-рослин знижувався до 30,0% на варіанті із забрудненням 10,0 г/кг ґрунту. За концентрації нафтопродуктів на рівні 100,0 г/кг схожість не з'являлася взагалі (рис. 1).

Фітотоксичність ґрунту визначали за середньою довжиною паростків тест-рослин. На п'яту добу суттєвої різниці між

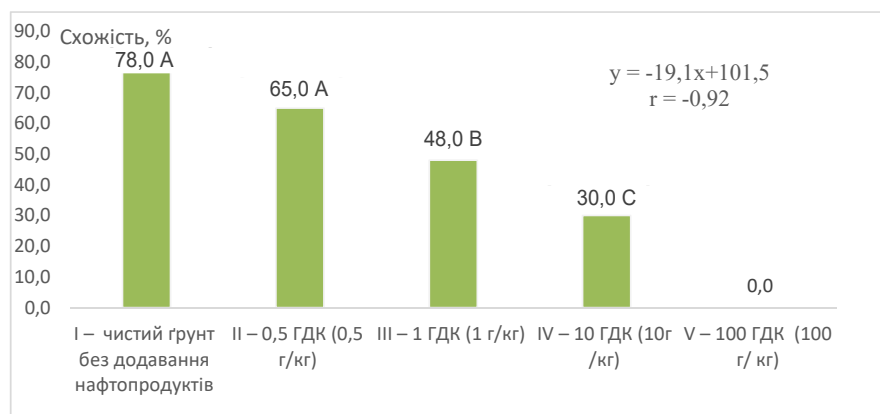


Рис. 1. Вплив забруднення ґрунту на схожість насіння тест-рослин (стовбці з різними літерами позначають суттєву різницю між варіантами ($p < 0,05$) за тестом Тьюкі (HSD))

довжиною паростків не спостерігали. На чистому ґрунті довжина паростків становила 0,75 см та знижувалась відповідно до забруднення ґрунту, до 0,5 см на варіанті із забрудненням на рівні 1,0 ГДК.

На сьому добу на чистому ґрунті довжина паростків у середньому становила 3,5 см, суттєво зменшувалась (до 1,5 см) на варіанті з концентрацією забруднення 10,0 г/кг ґрунту. За високого рівня забруднення проростання рослин не відбувалося зовсім. На 10 добу спостерігали поступове зниження довжини паростків зі збільшенням концентрації забруднювача – із 7,8 см на чистому ґрунті до 6,6 см за забруднення на рівні 1,0 ГДК. Суттєве зниження даного параметра порівняно із чистим ґрунтом спостерігали в разі збільшення концентрації забруднення до 10,0 та 100,0 ГДК (табл. 2).

Показники фітотоксичності ґрунту за довжиною паростків тест-рослин на п'яту, сьому та десятю добу проведення спостережень представлено на рисунку 2. За результатами проведених розрахунків було встановлено, що мінімальне забруднення ґрунту (на рівні 0,5–1,0 ГДК) спричиняє слабкий ефект фітотоксичності на рівні 6,6–15,0%, залежно від варіанту та доби спостереження. Підвищення концентрації забруднювача до 10,0 ГДК спричиняло зростання фітотоксичності на десятю добу до 35,0%, що відповідає середньому рівню. За надзвичайно високого забруднення (100,0 г/кг ґрунту) фітотоксичність досягала критичних показників – 77,0–100,0%, що робить ґрунт практично непридатним для росту рослин.

Обговорення

За результатами встановленого впливу фітотоксичності, на нашу думку, є всі підстави стверджувати, що у збільшених концентраціях нафтопродукти можуть порушувати водний режим ґрунту, знижувати доступність поживних елементів і створю-

вати токсичні умови, які пригнічують клітинне дихання та поділ клітин за появи сходів. Окрім того, зниження активності проростання може бути пов'язане з утворенням на поверхні ґрунту щільної масляної плівки, яка перешкоджає доступу кисню до насіння. Токсичні речовини нафтопродуктів можуть проникати всередину клітин, порушувати функціонування ферментних систем, необхідних для проростання та подальшого росту.

Зі збільшенням рівня забруднення ґрунту нафтопродуктами утворюються умови, які є несумісними з нормальним розвитком рослин. Це демонструє високу чутливість паростків до наявності нафтових забруднень, особливо на ранніх стадіях їхнього розвитку, що може становити серйозну загрозу для відновлення рослинного покриву на територіях, що зазнали забруднення. Такий вплив має потенціал призводити до значних екологічних наслідків.

Висновки

Отримані результати досліджень демонструють високу чутливість рослин до забруднення чорноземного ґрунту нафтопродуктами та підкреслюють їхній негативний вплив на екологічний стан ґрунтів. Навіть невеликі концентрації забруднювача характеризуються шкідливим ефектом, а за високого рівня забруднення ґрунту взагалі стають непридатним для вирощування рослин. Так, зі зростанням концентрації забруднення ґрунту спостерігали пропорційне зменшення довжини паростків насіння редису, що підтверджує негативний вплив забруднення на процеси, які забезпечують ріст рослин.

Результати проведеного моделювання та оцінювання рівня фітотоксичності ґрунтів нафтопродуктами можуть бути використані для формування науково обґрунтованих рекомендацій щодо управління забрудне-

Таблиця 2

Аналіз біометричних показників тест-рослин (довжини паростків, см)

Варіанти дослідження	Доба проведення спостережень		
	5-та доба	7-ма доба	10-та доба
Чистий ґрунт	0,75a* ± 0,19	3,5a ± 0,41	7,8a ± 0,37
0,5 ГДК	0,70a ± 0,19	3,2a ± 0,41	7,0a ± 0,37
1,0 ГДК	0,65a ± 0,19	3,0a ± 0,41	6,6a ± 0,37
10,0 ГДК	0,50a ± 0,19	1,5в ± 0,41	5,1в ± 0,37
100,0 ГДК	0	0	1,8в ± 0,37

Примітка: * – значення з різними літерами в межах окремого дня проведення визначень позначають суттєву різницю між варіантами ($p < 0,05$) за тестом Тьюкі (HSD).

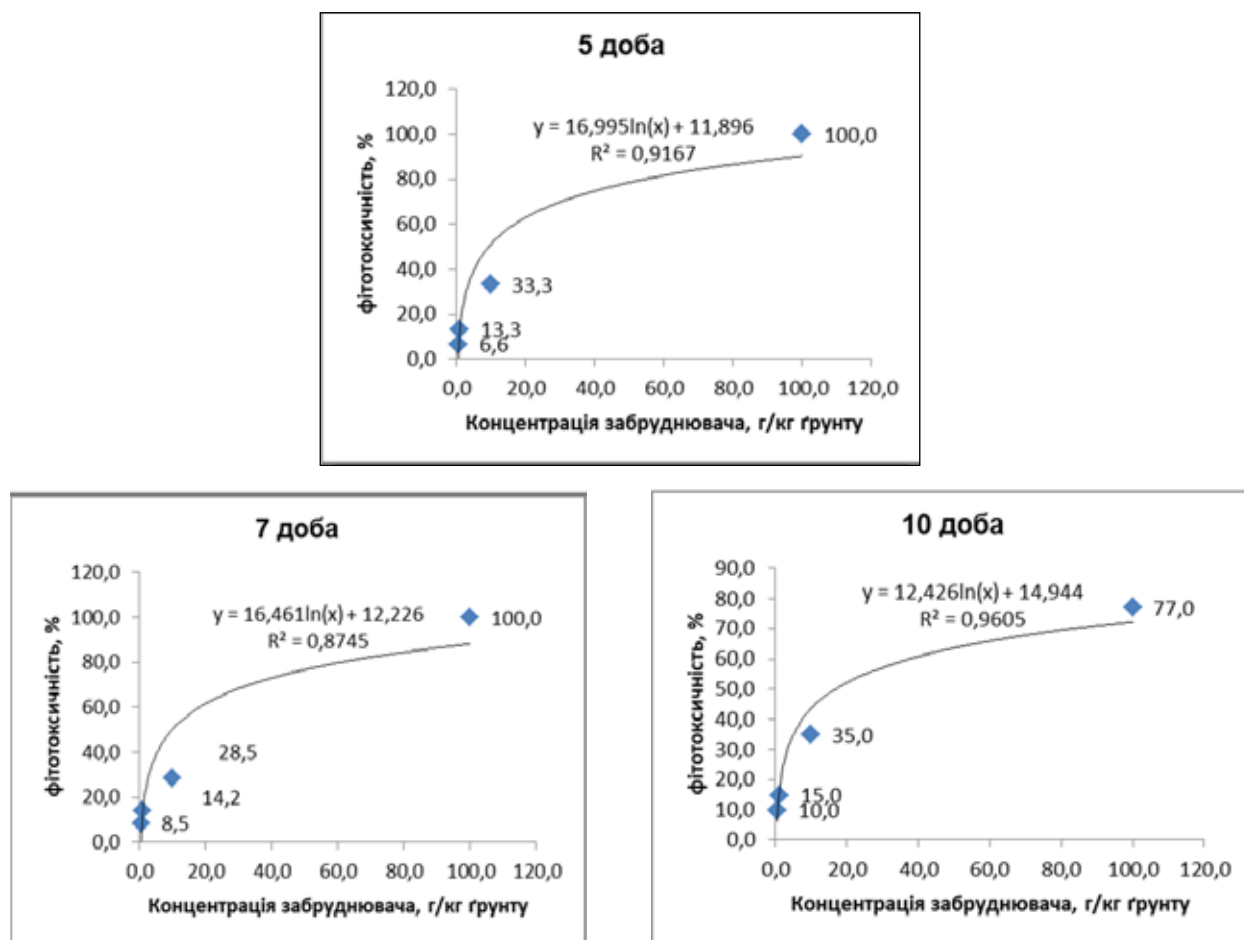


Рис. 2. Моделювання залежності фітотоксичності ґрунту від концентрації забруднення

ними територіями, підготовки стандартів щодо запобігання деградації ґрунтів та впровадження ефективних заходів щодо їх відновлення. Отримані результати підтвердили високу чутливість рослин до забруднення чорноземних ґрунтів нафтопродуктами, що підкреслює важливість запобігання забруд-

ненню даного типу ґрунтів і необхідність використання комплексного підходу до їх подальшого відновлення. Вибір методів відновлення має враховувати не лише економічну ефективність, а й екологічну безпеку, оскільки некоректні дії можуть призвести до подальшого погіршення стану екосистеми.

Список використаної літератури

- Бабаджанова О.Ф., Сукач Ю.Г., Сукач Р.Ю. Фітотоксичність ґрунтів, забруднених дизельним паливом. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України*. 2017. № 3. С. 92–94.
- Боднарчук Р.М., Вакерич М.М., Петросова В.І., Ніколайчук В.І., Гасинець Я.С. Вплив забруднення нафтопродуктами мікробіоценоз ґрунту та фітотоксичний ефект у умовах Ужгородського району Закарпаття. *Науковий вісник Ужгородського університету*. 2017. Вип. 42. С. 86–93.
- Балюк С.А., Кучер А.В., Ромащенко М.І. Ґрунтовий покрив України в умовах воєнних дій: стан, виклики, заходи з відновлення : монографія. Київ : Аграрна наука, 2024. 340 с.
- Диняк О.В., Кошлякова І.Є. Потенційна небезпека для довкілля та населення від нафтохімічного забруднення геологічного середовища внаслідок бойових дій. *Екологічні науки*. 2023. № 6 (51). С. 136–141. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.22>.
- Жолобак Г.М., Дугін С.С., Сибірцева О.М., Дорофей Є.М. Дослідження нафтозабрудненого ґрунту і рослинного покриву, вирощеного на ньому, методом гіперспектрального дистанційного зондування із застосуванням спектрорадіометра ASD FieldSpec®3FR. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2018. № 19. С. 12–29.

Колеснікова Л.А., Федюшко М.П. Аналіз фітотоксичності нафтозабруднених ґрунтів. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2015. № 1–2. С. 41–43. <https://doi.org/10.31210/visnyk2015.1-2.07>.

Крайнюков О.М., Кривицька І.А., Хоменко А.С. Оцінка впливу виробничої діяльності нафтопереробного підприємства на екологічний стан ґрунтового покриву. *Молодий вчений*. 2020. № 5 (81). С. 307–312. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-5-81-62>.

Круглов О.В., Коляда В.П., Корчашкіна Л.А. Сучасна технологія прогнозу забруднення довкілля засобами захисту рослин та добривами у результаті поверхневого стоку. *Збірник матеріалів Звітної науково-практичної конференції Луганського національного аграрного університету*. Харків : Стильна типографія, 2018. С. 18–20.

Мандрик О.М., Лукинчук О.І. Удосконалення способу очищення ґрунту забрудненого нафтопродуктами. *Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва*. 2023. Вип. 103. С. 273–281. <https://doi.org/10.32782/2415-8240-2023-103-1-273-281>.

Романюк О.І., Шевчик Л.З., Ощиповський І.В., Жак Т.В. Методика екологічного оцінювання нафтозабруднених ґрунтів. *Вісник Дніпропетровського університету*. Серія «Біологія, екологія». 2016. № 24 (2). С. 264–269.

Шевчик-Костюк Л.З., Романюк О.І., Ощиповський І.В. Особливості забруднення ґрунтів нафтою та нафтопродуктами: огляд. *Acta Biologica Ukrainica*. 2022. № 1. С. 32–40. <https://doi.org/10.26661/2410-0943-2022-1-04>.

Agamuthu P., Abioye O.P., Aziz A. Phytoremediation of soil contaminated with used lubricating oil using *Jatropha curcas*. *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 179. № 1–3. P. 891–894. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.03.088>.

Balseiro-Romero M., Monterroso C., Casares J. Environmental fate of petroleum hydrocarbons in soil: review of multiphase transport, mass transfer, and natural attenuation processes. *Pedosphere*. 2018. Vol. 28. № 6. P. 833–847. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60046-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60046-3).

Haider F.U., Ejaz M., Cheema S.A., Khan M.I., Baowei Zhao, Cai Liqun, Salim M.A., Naveed M., Khan N., Núñez-Delgado A., Mustafa A. Phytotoxicity of petroleum hydrocarbons: Sources, impacts and remediation strategies. *Environmental Research*. 2021. Vol. 197. P. 111031. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111031>.

Krainiukov O., Miroshnychenko I., Siabruk O., Hladkikh Y. Effect of oil contamination on the course of changes in chernozem properties and phytotoxicity. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series "Geology. Geography. Ecology"*. 2022. № 57. P. 296–306. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-22>.

Taheri M., Moteszarezhadeh B., Zolfaghari A., Javadzarrin I. Phytoremediation modeling in soil contaminated by oil-hydrocarbon under salinity stress by eucalyptus : A comparative study. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. Vol. 150. P. 162–169. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.04.016>.

References

Babadzhanova, O.F., Sukach, Yu.H., & Sukach, R.Yu. (2017). Fitotoksichnist gruntiv, zabrudnennykh dyzelnym palyvom [Phytotoxicity of soils contaminated with diesel fuel]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy [Scientific Bulletin of NLTU Ukraine]*, 3, 92–94 [in Ukrainian].

Bodnariuk, R.M., Vakerych, M.M., Petrosova, V.I., Nikolaichuk, V.I., & Hasynets, Ya.S. (2017). Vplyv zabrudnennia naftoproduktamy na mikrobiotsenoz gruntu ta fitotoksichniy efekt v umovakh uzhhorodskoho raionu Zakarpattia [Influence of oil pollution on soil microbiocenosis and phytotoxic effect in Uzhhorod district of Zakarpattia]. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu [Scientific Bulletin of Uzhhorod University]*, 42, 86–93 [in Ukrainian].

Baliuk, S.A., Kucher, A.V., & Romashchenko, M.I. (ed.) (2024). Gruntovyi pokryv Ukrainy v umovakh voiennykh dii: stan, vyklyky, zakhody z vidnovlennia: monohrafiia [Soil Cover of Ukraine in the Context of Military Operations: Status, Challenges, and Restoration Measures: monograph]. Kyiv: Ahrarna nauka. 340 p. [in Ukrainian].

Dyniak, O.V., & Koshliakova, I.Ie. (2023). Potentsiina nebezpeka dlia dovkillia ta naselennia vid naftokhimichnoho zabrudnennia heolohichnoho seredovyshcha vnaslidok boiovykh dii [Potential danger to the environment and the population from petrochemical contamination of the geological environment as a result of hostilities]. *Ekolohichni nauky [Environmental sciences]*, 6 (51), 136–141. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.22> [in Ukrainian].

- Zholobak, H.M., Duhin, S.S., Sybirtseva, O.M., & Dorofei, Ye.M. (2018). Doslidzhennia naf-tozabrudnenoho gruntu i roslynnoho pokryvu, vyroshchenoho na nomu, metodom hiperspek-tralnogo dystantsiinoho zonduvannia iz zastosuvanniam spektrometri ASD FieldSpec®3FR [Investigation of oil-contaminated soil and vegetation cover grown on it by hyperspectral remote sensing using ASD FieldSpec®3 FR spectroradiometer]. *Ukrainskyi zhurnal dystantsiinoho zonu-vannia Zemli [Ukrainian Journal of Earth Remote Sensing]*, 19, 12–29 [in Ukrainian].
- Koliesnikova, L.A., & Fediushko, M.P. (2015). Analiz fitotoksychnosti naftozabrudnenykh gruntiv [Analysis of phytotoxicity of oil-contaminated soils]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrar-noi akademii [Bulletin of Poltava State Agrarian Academy]*, 1–2, 41–43. <https://doi.org/10.31210/visnyk2015.1-2.07> [in Ukrainian].
- Krainsiukov, O.M., Kryvytska, I.A., & Khomenko, A.S. (2020). Otsinka vplyvu vyrobnychoi dial-nosti naftopererobnoho pidpriemstva na ekolohichni stan gruntovoho pokryvu [Assessment of the impact of production activities of an oil refinery on the ecological state of the soil cover]. *Molodyi vchenyi [Young scientist]*, 5 (81), 307–312. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-5-81-62> [in Ukrainian].
- Kruhlov, O.V., Koliada, V.P., & Korchashkina, L.A. (2018). Suchasna tekhnolohiia prohnozu zabrudnennia dovkillia zasobamy zakhystu roslyn ta dobryvamy u rezultati poverkhnevoho stoku [Modern technology for predicting environmental pollution by plant protection products and fertilizers as a result of surface runoff]. *Zbirnyk materialiv zvitnoi naukovo – praktychnoi konferentsii Luhanskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu [Collection of materials of the reporting scientific and practical conference of Luhansk National Agrarian University]*. Kharkiv : Styl'na typohrafiia, 18–20 [in Ukrainian].
- Mandryk, O.M., & Lukynchuk, O.I. (2023). Udoskonalennia sposobu ochyshchennia gruntu zabrudnenoho naftoproduktamy [Improvement of the method of soil purification contaminated with oil products]. *Zbirnyk naukovykh prats Umanskoho natsionalnoho universytetu sadiivnytstva [Collection of scientific works of Uman National University of Horticulture]*, 103, 273–281. <https://doi.org/10.32782/2415-8240-2023-103-1-273-281> [in Ukrainian].
- Romaniuk, O.I., Shevchyk, L.Z., Oshchapovskyi, I.V., & Zhak, T.V. (2016). Metodyka ekolo-hichnoho otsiniuvannia naftozabrudnenykh gruntiv [Methodology for environmental assessment of oil-contaminated soils]. *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu. Biologiya, ekologiya [Bulletin of Dnipropetrovsk University. Biology, ecology]*, 24 (2), 264–269 [in Ukrainian].
- Shevchyk-Kostiuk, L.Z., Romaniuk, O.I., & Oshchapovskyi, I.V. (2022). Osoblyvosti zabrudnennia gruntiv naftoiu ta naftoproduktamy: ohliad [Peculiarities of soil contamination by oil and oil products: a review]. *Acta Biologica Ukrainica*, 1, 32–40. <https://doi.org/10.26661/2410-0943-2022-1-04> [in Ukrainian].
- Agamuthu, P., Abioye, O.P., & Aziz, A. (2010). Phytoremediation of soil contaminated with used lubricating oil using *Jatropha curcas*. *Journal of Hazardous Materials*, 179, 1–3, 891–894. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.03.088> [in English].
- Balseiro-Romero, M., Monterroso, C., & Casares, J. (2018). Environmental fate of petroleum hydrocarbons in soil: review of multiphase transport, mass transfer, and natural attenuation processes. *Pedosphere*, 28, 6, 833–847. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60046-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60046-3) [in English].
- Haider, F.U., Ejaz, M., Cheema, S.A., Khan, M.I., Baowei, Zhao, Cai, Liqun, Salim, M.A., Naveed, M., Khan, N., Núñez-Delgado, A., Mustafa, A. (2021). Phytotoxicity of petroleum hydrocarbons: Sources, impacts and remediation strategies. *Environmental Research*, 197, 111031. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111031> [in English].
- Krainsiukov, O., Miroshnychenko, I., Siabruk, O., & Hladkikh, Y. (2022). Effect of oil contami-nation on the course of changes in chernozem properties and phytotoxicity. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, (57), 296–306. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-22> [in English].
- Taheri, M., Moteszarehadeh, B., Zolfaghari, A., & Javadzarrin, I. (2018). Phytoremediation modeling in soil contaminated by oil-hydrocarbon under salinity stress by eucalyptus (A compar-ative study). *Computers and Electronics in Agriculture*, 150, 162–169. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.04.016> [in English].

Отримано: 24.04.2025
Прийнято: 15.05.2025



УДК 502.17:632.93.4:633/635.055](477.46-21)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.38>

ПЕРСПЕКТИВА ВИКОРИСТАННЯ БІОХІМІЧНИХ ПРЕПАРАТІВ У БОРОТЬБИ ЗІ ШКІДНИКАМИ ДЕРЕВНИХ РОСЛИН У МІСЬКИХ УМОВАХ

А. Б. Яшук¹

В Україні надзвичайно поширений у міських екосистемах гіркокаштан звичайний (*Aesculus hippocastanum*). На деревах в урбоценозах часто спостерігаються спалахи розмноження та поширення комах-шкідників, що знижує життєстійкість і декоративні якості рослин. З 1998 року територією України швидко поширилась каштанова мінуюча міль (*Cameraria ohridella* Deschka (Lepidoptera, Gracillariidae)), що призвело до масового ураження каштанів і поширеної передчасної дефоліації, наслідком якої є ослаблення дерев і зниження їхніх адаптаційних можливостей. Неможливість відкритого використання інсектицидів у міському середовищі зумовила розроблення в європейських країнах методики імунізації міської деревної рослинності шляхом введення у ксилему стовбура рослини хімічних препаратів для захисту. Досвід використання неонікотиноїдів у вегетативній ендотерапії дерев показав їхні небезпечні наслідки не тільки для бджіл, але й для міської фауни, що привело до заборони препаратів цієї групи в Європі у 2018 році. Компанією "Syngenta" була розроблена програма захисту деревних рослин "TreeCare" на основі інноваційного препарату Ривайв – інсектициду другого покоління. Протягом 2022–2024 років у Черкасах було проведено дослідження ефективності використання препарату Ривайв шляхом імунізації 1,5 тисячі штамбів гіркокаштану звичайного в центральному районі міста. Ефективність використання препарату оцінювали за допомогою візуальних спостережень за ступенем ураження листової пластинки дерев у літній період. Найкращі результати імунізації дерев спостерігались у перший рік після проведення стовбурових ін'єкцій. Причини зниження ефективності дії препарату через два роки дії захисної сили інсектициду можуть мати комплексний характер (сукупність негативних екологічних чинників міських екосистем і послаблений фізіологічний стан рослин). Висока вартість лікування дерев цим препаратом суттєво обмежує можливості використання Ривайву міськими комунальними підприємствами й потребує залучення приватних інвестицій для підтримання довготривалих програм зі збереження і захисту міських деревних насаджень від шкідників.

Ключові слова: *Aesculus hippocastanum*, *Cameraria ohridella*, дефоліація, декоративність, стовбурні ін'єкції, урбоценози, біохімічні інсектициди.

¹ кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри екології
(Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси)
e-mail: L_yashchuk@ukr.net
ORCID: 0000-0001-8975-851X

PROSPECTS OF USING CHEMICAL MEANS TO CONTROL WOOD PLANT PESTS IN URBAN CONDITIONS USING THE EXAMPLE OF THE CITY OF CHERKASY

L. B. Yashchuk

In Ukraine, the common horse chestnut *Aesculus hippocastanum* is extremely common in urban ecosystems. Outbreaks of reproduction and spread of insect pests are often observed on trees in urban ecosystems, which reduces the viability and decorative qualities of plants. Since 1998, the chestnut borer moth (*Cameraria ohridella* Deschka (Lepidoptera, Gracillariidae)) has rapidly spread across the territory of Ukraine, leading to massive damage to horse chestnut and widespread premature defoliation, resulting in the weakening of trees and a decrease in their adaptive capabilities. The impossibility of openly using insecticides in an urban environment led to the development in European countries of a method for immunizing urban woody vegetation by introducing chemical preparations into the xylem of the plant trunk for protection – stem injection. The experience of using neonicotinoids in vegetative endotherapy of trees has shown their dangerous consequences not only for bees, but also for other urban fauna, which led to the ban of drugs of this group in Europe in 2018. Syngenta has developed a tree plant protection program Tree Care based on the innovative drug Revive, a second – generation insecticide.

During 2022–2024, a study was conducted in Cherkasy on the effectiveness of the use of the drug Revive by immunizing 1,5 thousand chestnut *Aesculus hippocastanum* in the central district of the city. The effectiveness of the drug was assessed using visual observations of the degree of damage to the leaf blade of trees in the summer period. The best results of tree immunization were observed in the first year after stem injections. The reasons for the decrease in the effectiveness of the drug after two years of insecticide protection may be complex (a combination of negative environmental factors of urban ecosystems and a weakened physiological state of plants). The high cost of treating trees with this drug significantly limits the possibilities of using Rivayvu by urban utilities and requires attracting private investment to maintain long-term programs to preserve and protect urban tree plantations from pests.

Key words: *Aesculus hippocastanum*, *Cameraria ohridella*, defoliation, decorativeness, stem injections, urbocenoses, biochemical insecticides.

Вступ

Стійкість урбоєкосистеми значною мірою залежить від ступеня її озеленення. Норма зелених насаджень загального користування для великих міст становить 21 м² на одну людину, або 2,1 гектара на 1 000 осіб (Благоустрій ..., 2006). Деревні рослини в умовах сучасних мегаполісів можуть зазнавати значного негативного впливу антропогенних чинників різного походження (Бессонова, 2024; Коршиков та ін., 2018). Поява тривалих періодів надзвичайної спеки внаслідок глобального потепління призводить до послаблення стійкості й адаптаційних можливостей міської рослинності. На деревах у штучних екосистемах часто спостерігається масове розмноження та поширення комах-шкідників, що знижує їхню життєстійкість і декоративні якості. Вплив комах виявляється в порушенні структури крон, частковій або цілковитій утраті листя (хвої) або його недорозвиненні, зменшенні приросту, зменшенні стійкості до дії вітру й інших чинників, погіршенні санітарного стану дерев, а в найгіршому разі – загибелі рослин (Пузріна, 2021). Нагальною нагальною є проблема появи та масового

поширення інвазивних видів (Костюшин і Домашнінець, 2023). Результатом їх нападу часто можуть бути непоправні екологічні наслідки, які призводять до значних біологічних і економічних збитків у житті цілих екосистем. Прикладом є поява на території України каштанової мінуючої молі (*Cameraria ohridella* Deschka (Lepidoptera, Gracillariidae)). Мінуюча міль була зафіксована в 1998 р. лише на Закарпатті, а вже у 2018 р. її ареал поширився майже на всю країну (Роговський і Драган, 2009).

Існують різні способи боротьби зі шкідниками рослин у природних умовах. Особливістю використання інсектицидів в урбофітоценозах є заборона відкритого обприскування хімічними засобами міської рослинності через присутність людей. Біологічні засоби боротьби зі шкідниками в таких екосистемах є більш привабливими, але суттєва залежність від метеорологічних умов (температура повітря, кількість опадів, вітер) часто робить їх малоефективними. Для контролю за чисельністю шкідливих комах часто використовуються комплексні методи. Зокрема, для стримування спалахів чисельності популяції каштанової міну-

ючої моли використовуються феромонні та кольорові пастки та клейові стрічки. Головним недоліком таких пасток є значна залежність від метеорологічних умов і етапів життєвого циклу шкідників. Використання пасток у боротьбі з каштановою мінуючою міллю потребує уваги до їхньої конструкції, місця та термінів розміщення на деревах, зокрема й консультацій науковців для працівників зелених господарств. Кольорові пастки продемонстрували гарні результати з моніторингу чисельності шкідника, але не в захисті дерев (Бащенко та ін., 2024). Перспективним напрямом боротьби зі шкідливими комахами є поява нових біохімічних препаратів, які високоефективні та безпечні для людей. Пошук дієвих ін'єкційних інсектицидів для захисту деревних рослин в умовах урбоєкосистем актуальний для зелених господарств і екологічних служб міст.

Метою роботи було дослідження ефективності препарату Ривайв для захисту гіркогокаштану звичайного від каштанової мінуючої моли в рамках програми "Tree Care" в умовах міста Черкас, оцінювання перспективності подальшого використання препарату в розробленні стратегії боротьби зі шкідниками деревних культур.

Матеріал і методи

Для проведення досліджень було вибрано препарат Revive (Ривайв) виробництва компанії "Syngenta". Захисну дію інсектициду визначали для гіркогокаштану звичайного, поширеного в містах України. Спостереження за ступенем ураження дерев гіркогокаштану звичайного (*Aesculus hippocastanum*) каштановою мінуючою міллю (*Cameraria ohridella* Deschka (*Lepidoptera*, *Gracillariidae*)) здійснювалися протягом 2022–2024 рр. Дослідження проводились разом із працівниками комунального підприємства «Дирекція парків» (м. Черкаси), департаменту дорожньо-транспортної інфраструктури та екології черкаської міської адміністрації та кафедри екології Черкаського державного університету. Для оцінювання результативності дії препарату в боротьбі зі шкідником було вибрано 100 дерев гіркогокаштану звичайного на центральній алеї міста. Ступінь ураження дерев шкідником визначали візуально, під час огляду листових пластинок рослини у травні – червні. Пошкодження асиміляційної поверхні рослин гіркогокаштану звичайного мінуючою міллю визначали візуально за 5-бальною шкалою (табл. 1).

Таблиця 1

Бальна система оцінювання ураження асиміляційної поверхні листків гіркогокаштану звичайного мінуючою міллю

Кількість балів	Ступінь пошкодження листової пластинки (%)
1	10
2	25
3	50
4	75
5	100

Для боротьби з мінуючою міллю використовувався ін'єкційний препарат Revive хімічної групи авермектинів виробництва компанії "Syngenta". Хімічну імунізацію крон дерев здійснювали в період від початку розпускання листя до закінчення цвітіння, але до початку масового заселення шкідником, за середньодобової температури повітря в межах 10–13 °С. Для цього у стовбурі дерев на висоті 5–30 см від поверхні ґрунту свердлом діаметром 8–10 мм робили отвори на глибину 25–40 мм лубу (за винятком кори). Отвори розміщували рівномірно по колу стовбура в кількості залежно від діаметра дерева, з подальшим їх закриттям спеціальною втулкою для інжектора.

Результати та їх обговорення

Гіркогокаштан звичайний є однією з найрозповсюдженіших порід дерев, численні насадження або окремі дерева якого можна побачити в будь-якому українському місті. Його поширеність в урбанізованому середовищі пов'язана зі стійкістю рослини до несприятливих екологічних чинників.

Черкаси – місто Центрального регіону України, яке інтенсивно почало забудовуватись у середині ХХ ст. За показником «площа озеленення на 1 містянина» натеper м. Черкаси посідає середнє місце порівняно з іншими містами України (рис. 1) (Очеретний та ін., 2017).

Гіркогокаштан звичайний (*Aesculus hippocastanum*) був масово висаджений у місті в 70-ті рр. минулого століття. Нині в Черкасах налічується приблизно 4 тис. *Aesculus hippocastanum*, із яких понад 1,5 тис. дерев утворюють найдовшу в Європі каштанову алею в центральній частині міста. Найбільшого антропогенного тиску зазнають рослини в центральній частині міста, де каштанова алея є роздільною межею для транспортних потоків. Гіркогокаштан звичайний характеризується як дерево 1–2 величини, належить до видів із середньою стійкістю до забруднення

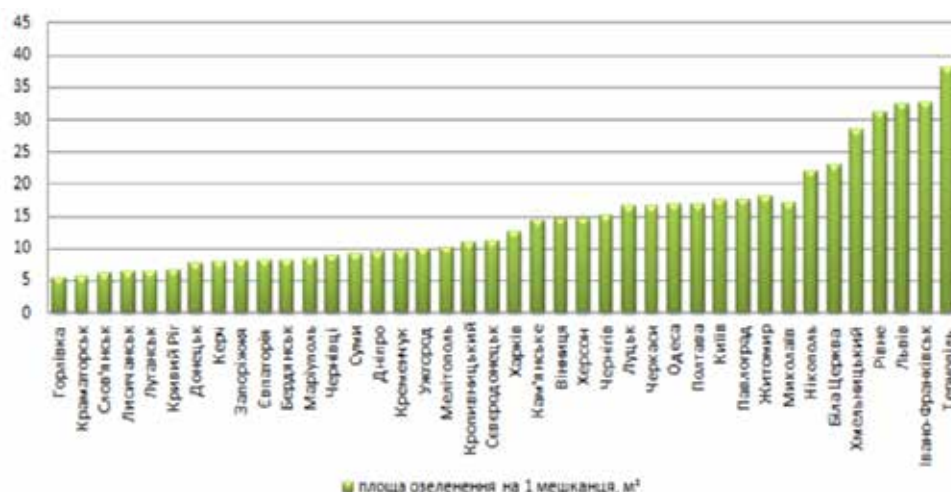


Рис. 1. Площа озеленення на 1 мешканця за містами України (м²)

полютантами (Кожно та ін., 2002). Місто Черкаси є обласним центром із потужними промисловими підприємствами та розвинутою транспортною інфраструктурою, тому міська біота перебуває в умовах підвищеної загазованості, ущільнення та засолення ґрунту, що призводить до ослаблення організмів і погіршення їхніх адаптивних властивостей. Значного негативного впливу рослини урбоценозу зазнають через формування тривалих засух у весняно-літній період, що стає типовим явищем для Центрального регіону України в умовах глобального потепління.

Починаючи із 2008 р. в місті спостерігається масове розмноження мінуючої каштанової молі (*Cameraria ohridella*), яка поїдає листя каштанів, через що воно передчасно жовтіє і опадає (рис. 2).

Біологія та життєвий цикл *Cameraria ohridella* досліджені багатьма іноземними та вітчизняними вченими (Pavan et al., 2003, Straw & Williams, 2013, Дрозда та ін., 2013).

За спостереженнями вчених, в умовах України мінер дає три-чотири повноцінні покоління. За досить щільного зараження (найчастіше другим і третім поколінням мінерів) міни каштанової молі можуть охоплювати практично всю листову пластину гіркого каштану (Левон та ін., 2008).

Cameraria ohridella як інвазивний вид не має природних ворогів в Україні та більшу частину життєвого циклу проводить у середині листка. У разі щільного зараження листя каштановою міллю дерево може втратити до 80% свого фотосинтезувального апарату (рис. 3).

Спостереження за життєвим циклом каштанової мінуючої молі протягом 2022–2024 рр. у Черкасах показали утворення чотирьох генерацій кожного року. Термін розвитку окремої генерації становив приблизно від 65 до 110 діб.

Ступінь ураження штамбів гіркого каштану в Черкасах *C. Ohridella* залежить від місця розміщення рослин. Стан дерев, що ростуть



Рис. 2. Наслідки ураження гіркого каштану звичайного (*Aesculus hippocastanum*) каштановою мінуючою міллю (*Cameraria ohridella* Deschka (*Lepidoptera*, *Gracillariidae*)) на бульварі Шевченка (м. Черкаси)



Рис. 3. Динаміка пошкодження одного листка гіркокаштану звичайного гусенями мінуючої каштанової молі протягом травня – липня (вегетаційного сезону) (Акімов та ін., 2006)

у парковій зоні та вздовж транспортних магістралей, суттєво різняться. Моніторинг чисельності фітофага показав, що найменше шкідником уражаються дерева в зелених, умовно «екологічно чистих», міських районах, найбільше – уздовж транспортних магістралей. Таку закономірність зазначено протягом трьох років спостережень (табл. 2).

Несприятливі екологічні умови міста впливають на тривалість розвитку генерацій шкідника на деревах. Доведено, що в більш посушливих і загазованих умовах тривалість розвитку кожної генерації каштанової мінуючої молі скорочується приблизно на 2 тижні. Зменшення тривалості розвитку на фоні дефоліації гіркокаштанів в умовах техногенно забрудненого середовища створює більш сприятливі умови для успішного розвитку гусені четвертої генерації та чисельності шкідника загалом (Трибель та ін., 2008).

Головним способом боротьби з каштановою міллю протягом 2005–2020 рр. у Черкасах було збирання та знищення опалого листя для ліквідації зимуючих стадій шкідника. У 2009 р. комунальними службами міста вперше було використано біологічний засіб боротьби за допомогою трихограми. Додатковим засобом боротьби стало накладання липучих стрічок на стовбури дерев. Відсутність ефективних результатів використаних засобів боротьби щорічно призводить до масового скидання листя міськими каштанами в серпні, через що дерева не встигають відновлювати листя

після дефоліації до кінця періоду вегетації. Візуальні спостереження за станом листових пластинок у 2022 р. дозволили оцінити ступінь заселення дерев мінуючою міллю як надзвичайно високий (рис. 4).

Неможливість відкритого використання інсектицидів у міському середовищі зумовила розроблення методики ін'єкційного захисту хімічними препаратами стовбурів міської деревної рослинності в європейських країнах. Ін'єкція стовбура (вегетативна ендотерапія) є методом введення у ксилему стовбура рослини пестицидів для захисту від шкідників або хвороб (Ferreira et al., 2023). Для боротьби з каштановою міною широко використовувався Імідаклоприд, який по судинній системі дерева проникає переважно до листових пластинок і не потрапляє у плоди. Дослідження тривалості дії цього препарату показали, що навіть через 14 років після разової ін'єкції дерева гіркокаштану звичайного зберігали залишки препарату й були більш стійкі до ураження *Cameraria ohridella* (Walczak et al., 2024).

У 2013 р. із залученням польських науковців у Черкасах була проведена стовбурна імунізація гіркокаштану звичайного в центральному районі міста препаратом Камеркіл на основі Імідаклоприду, але результативність лікування дерев виявилась низькою. Водночас поширене використання неоникотиноїдів, передусім Імідаклоприду, спричиняє синдром руйнування бджолиних сімей, через що в Європі заборонено його використання просто неба (EU ..., 2018).

Таблиця 2
Чисельність мін *C. Ohridella* на листовій пластинці гіркокаштану звичайного в різних стаціях міста Черкас

№	Район спостережень	Кількість мін на одній листовій пластинці, шт.		
		2022 р.	2023 р.	2024 р.
1	Бульвар Шевченка (центральна алея)	350 ± 30,2	365 ± 33,1	330 ± 41,3
2	Парк Перемоги	220 ± 21,4	200 ± 18,3	215 ± 20,2

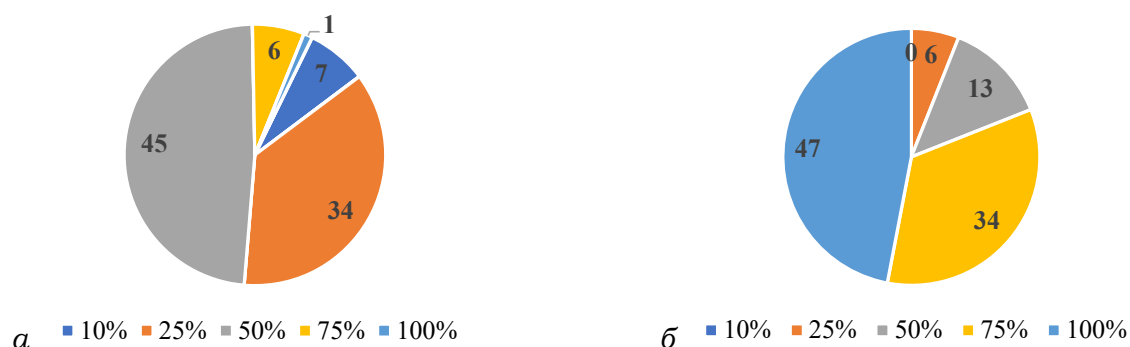


Рис. 4. Частка ураженої асиміляційної поверхні листків гіркокаштану звичайного мінуючою міллю: а – червень; б – серпень

У 90-х рр. минулого століття була розроблена нова група інсектицидів – авермектини, на основі продуктів життєдіяльності ґрунтових мікроорганізмів – актиноміцетів виду *Streptomyces avermitilis*. Авермектини мають дуже високу активність і широкий спектр антипаразитарної дії, є екологічно безпечними як для ґрунту, так і для рослин, тварин і людей. На основі авермектинів компанією “Syngenta” було розроблено Ривайв – інсектицид другого покоління, який забезпечує тривалий і ефективний захист саме гіркокаштану звичайного. Із 2018 р. на території України впроваджується програма захисту каштанів “TreeCare”. Для захисту дерев від мінуючої молі спеціально для каштанів і пальм було розроблено препарат Ривайв. Термін дії інсектициду становить 3 роки (Міль ..., 2021).

Спостереження за станом каштанів після ін’єкцій Ривайву протягом 2023–2024 рр. показало, що найкраще препарат знижує чисельність шкідника протягом першого року після імунізації. Надалі його дія дещо зменшується (рис. 5).

Незначне зниження ефективності препарату Ривайв на другий рік спостережень можна пояснити сукупністю дії кількох чинників:

- можливе недотримання методики проведення ін’єкцій у стовбур дерева;
- незадовільний фізіологічний стан дерева, якому здійснювали імунізацію;
- посилення впливу негативних екологічних чинників (зростання щільності транспортних потоків, зменшення кількості опадів протягом року, зростання середньорічної температури повітря) призводить до

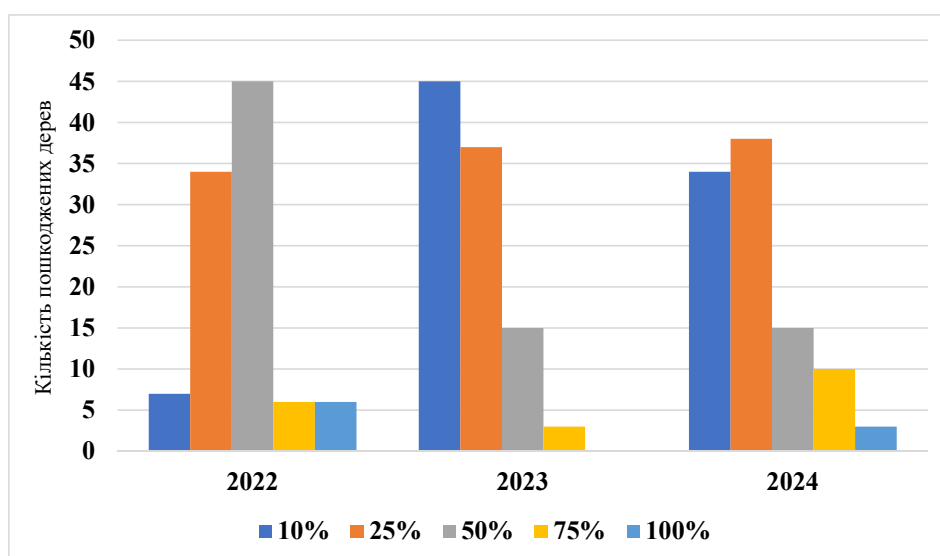


Рис. 5. Динаміка пошкоджень листової пластинки кінського каштану у травні 2022–2024 рр.

погіршення фізіологічного стану й адаптивних властивостей дерев.

Повна обробка препаратом одного каштана коштує приблизно 80\$, що є суттєвим фінансовим навантаженням для міських комунальних служб, тому в майбутньому продовження захисної програми для гіркогокаштанів "TreeCare" потребуватиме пошуку додаткових коштів або приватних інвестицій.

Висновки

Зміни кліматичних умов призводять до підвищення середньорічної температури повітря в Центральному регіоні України та створюють передумови для збільшення чисельності каштанової мінувчої молі (*Cameraria ohridella*), що є інвазивним видом і практично не має природних ворогів для регуляції чисельності.

Гіркокаштан звичайний (*Aesculus hippocastanum*) є надзвичайно поширеним видом деревних культур у містах України й зазнає значних пошкоджень унаслідок масового поширення *Cameraria ohridella*. Неприятливі екологічні умови урбоценозів і збільшення чисельності шкідника призво-

дять до передчасної дефоліації та загального послаблення дерев, втрати їхніх декоративних властивостей.

Відкрите використання хімічних засобів боротьби зі шкідливими комахами в міських умовах неможливе. Розроблення методик стовбурних ін'єкцій та імунізація дерев пестицидами дозволяють значно знизити негативний вплив каштанової мінувчої молі, сприяють оздоровленню міських фітоценозів. Досвід використання біохімічних препаратів на основі авермектинів, зокрема Ривайву компанії "Syngenta" для гіркокаштану звичайного, показує їхню високу ефективність у боротьбі із каштановою мінувчою міллю.

На ефективність дії Ривайву можуть впливати негативні чинники міського середовища та фізіологічний стан дерев. Висока вартість лікування дерев цим препаратом суттєво обмежує можливості його використання міськими комунальними підприємствами й потребує залучення приватних інвестицій для підтримання довготривалих програм зі збереження та захисту міських деревних насаджень від шкідників.

Список використаної літератури

Акімов І.А., Зерова М.Д., Нарольський Н.Б., Свиридов С.В., Коханець А.М., Никитенко Г.Н., Гершензон З.С. Біологія каштанової мінувчої молі – *Cameraria ohridella* (Lepidoptera: Gracillariidae) в Україні. *Вісник зоології*. 2006. № 40 (4). С. 321–332.

Бащенко М.М., Шита О.В., Федоренко А.В., Чайка В.М. Захист гіркокаштану звичайного (*Aesculus hippocastanum* L.) в урбанізованому середовищі. *Фітосанітарна безпека*. 2024. Вип. 70. С. 48–71.

Бессонова В.П. Фітоіндикація та фітомоніторинг : навчальний посібник. Дніпро : Герда, 2024. 206 с.

Благоустрій міст та населених пунктів : інформаційно-аналітичний збірник/ упоряд. С.В. Коваленко. Київ, 2006. 80 с.

Дрозда В.Ф., Кочерга М.О., Мельничук С.Д., Гойчук А.Ф., Брайко В.Б. Особливості біології, екології та контроль чисельності каштанової мінувчої молі (*Cameraria ohridella* Desch. & Dimic (Lepidoptera, Gracillariidae)) в умовах українського Полісся. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України*. 2013. Вип. 23 (2). С. 23–30.

Костюшин В.А., Домашлінець В.Г. Чужорідні види в Україні: питання моніторингу та створення інформаційної системи. *Знахідки чужорідних видів рослин та тварин в Україні*. Серія "Conservation Biology in Ukraine". 2023. Вип. 29. С. 9–14.

Кохно М.А., Пархоменко А.І., Зарубенко А.У. та ін. Дендрофлора України. Дикорослі й культивовані дерева і кущі. Покритонасінні. Ч. 1. Київ : Фітоцентр, 2002. 448 с.

Левон Ф.М., Ільєнко А.А., Назарова Н.А. Сучасний стан та проблеми збереження кінського каштану звичайного в зелених насадженнях м. Києва *Проблеми озеленення великих міст – 2008* : матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції. Київ, 2008. С. 108–110.

Моніторинг шкідливих організмів лісових екосистем : навчальний посібник / уклад. : Н.В. Пузріна та ін. Київ, 2021. 274 с.

Міль каштанова мінувча – загроза для насаджень гіркокаштану звичайного в Україні. 2021 [Електронний ресурс]. URL: <https://www.syngenta.ua/korysnaagronomichna-informaciya/zahyst-kashtaniv/mil-kashtanova-minuyucha-zagroza-dlya-nasadzhen> (дата звернення: 04.04.2025).

Очеретний В.П., Потапова Т.Е., Кузьміна Д.М., Сологор В.М. Сучасна тенденція скорочення площі зелених насаджень в світі. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2017. № 2. С. 69–76.

Роговський С.В., Драган Г.І. Заходи боротьби з мінуючою міллю як шкідником гіркокаштану звичайного в умовах лісостепу України. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України*. 2009. Вип. 19. С. 26–33.

Трибел С.О., Гаманова О.М., Свентославські Я. Каштанова мінуюча міль. Київ : Колобіг, 2008. 69 с.

EU to fully ban neonicotinoid insecticides to protect bees Reuters. 2018 [Електронний ресурс]. URL: <https://www.reuters.com/article/markets/commodities> (дата звернення: 18.03.2025).

Ferreira J.A., Esparraguera L.B., Queiroz S.C., Bottoli C.B. Vegetative Endotherapy – Advances, Perspectives, and Challenges. *Agriculture*. 2023. № 13 (7). P. 1–28.

Pavan F., Barro P., Dernadinell, I. Cultural control of *Cameraria ohridella* on horsechestnut in urban areas by removing fallen leaves in autumn. *Arboriculture*. 2003. 29. P. 253–258.

Straw N.A., Williams D.T. Impact of the leaf miner *Cameraria ohridella* (Lepidoptera: Gracillariidae) and bleeding canker disease on horse-chestnut: direct effects and interaction. *Agricultural and Forest Entomology*. 2013. № 15 (3). P. 321–333.

Walczak U., Mickiewicz A., Giertych M.J. Persistence of imidacloprid in trunk injected horse chestnut and its impact on *Cameraria ohridella* (Lepidoptera: Gracillariidae). *Applied Entomology and Zoology*. 2024. № 59 (2). p. 203–210 [Електронний ресурс]. URL: <https://link.springer.com/journal> (дата звернення: 06.03.2025).

References

Akimov, I.A., Zerova, M.D., Narolskyi, N.B., Svyrydov, S.V., Kokhanets, A.M., Nykytenko, H.N., & Hershenzon, Z.S. (2006). Biologiya kashtanovoi minuyuchoi moli – *Cameraria ohridella* (Lepidoptera: Gracillariidae) in Ukraine [Biology of the chestnut leaf miner in Ukraine]. *Visnyk Zoologiy [Bulletin of Zoology]*, 40 (4), 321–332 [in Ukrainian].

Bashchenko, M.M., Shyta, O.V., Fedorenko, A.V., & Chaika, V.M. (2024). Zahist girkokashtana zvychaynogo (*Aesculus hippocastanus* L.) v urbanizovanomu seredovyschi [Protection of the common horse chestnut (*Aesculus hippocastanus* L.) in an urban environment] *Phytosanitarna bezpeka [Phytosanitary safety]*, 70, 48–71. <https://doi.org/10.36495/PHSS.2024.70.48-71> [in Ukrainian].

Bessonova, V.P. (2024). Phytoindicaziya i phytomonitoring: navchalnyj posibnyk [Phytoindication and phytomonitoring: a study guide]. Dnipro : Gerda [in Ukrainian].

Kovalenko, S.V. (Ed). (2006). Blagoustriy mist ta naselenych punctiv: informaziyno–analitichnyy zbirnyk uporyad [Improvement of cities and settlements: information and analytical collection]. Kyiv [in Ukrainian].

Drozda, V.F., Kocherga, M.O., Melnychuk, S.D., Goychuk, A.F., & Brayko, V.B. (2013). Osoblyvosti biologii, ekologii ta control chyselnosti kashtanovoi minuyuchoi moli *Cameraria ohridella* Desch. & Dimic (Lepidoptera, Gracillariidae) v umowah Ukrainського Polissya [Peculiarities of biology, ecology and control of the number of chestnut mining moth *Cameraria ohridella* Desch. & Dimic (Lepidoptera, Gracillariidae) in the conditions of Ukrainian Polissya]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho lisotekhnichnoho universytetu Ukrainy [Scientific Bulletin of the National Technical University of Ukraine]*, 23 (2), 23–30 [in Ukrainian].

Kostyushyn, V.A., & Domashlinets, V.G. (2023). Chuzhoridni vydy v Ukraini: pytannya monitoringu ta stvorennia informazynoi bazy [Exotic species in Ukraine: issues of monitoring and creation of an information base]. *Znahidki chuzhoridnyh vydiv roslyn ta tvaryn. Seriya "Conservation Biology in Ukraine" [Discoveries of exotic species of plants and animals. Series "Conservation Biology in Ukraine"]*, 29, 9–14 [in Ukrainian].

Kohno, M.A., Parkhomenko, L.I., & Zarubenko, A.U., et al. (2002). Dendroflora v Ukraini. Dykorosli i kultyvovany dereva i kuschi. Pokrytonasinni. Chastyna 1 [Dendroflora in Ukraine. Wild and cultivated trees and bushes. Cover crops. Part 1]. Kyiv : Phytocenter [in Ukrainian].

Puzrina, N.V. (Ed). (2021). Monitoring shkidlyvyh organizmiv lisovyh ekosistem: navchalnyj posibnyk [Monitoring of harmful organisms in forest ecosystems: study guide]. Kyiv [in Ukrainian].

Mil kashtanovoi minuyucha – zagroza dlya nasadzen girkokashtana zvychaynogo v Ukraini [The chestnut borer is a threat to chestnut plantations in Ukraine] [Electronic resource]. URL:

<https://www.syngenta.ua/korysnaagronomichna-informaciya/zahyst-kashtaniv/mil-kashtanova-minuyucha-zagrozdlya-nasadzhen> (access date 04.04.25) [in Ukrainian].

Levon, F.M., Iliencko, A.A., & Nazarova, N.A. (2008) Suchasnyy stan ta problema zberezchenya kinskogo kashtanu zvychnaynogo v zelenykh nasadzchennyah m. Kyiva [Current status and problems of preserving common horse chestnut in green spaces of Kyiv]. *Problemy ozelenennya velykykh mist: materialy XI Mizchnarodnoy naukovoï i praktychnoy konferenzii* [Problems of greening large cities: materials of the XI International Scientific and Practical Conference]. Kyiv, pp. 108–110 [in Ukrainian].

Ocheretny, V.P., Potapova, T.E., Kuzmina, D.M., & Sologor, V.M. (2017). Suchasna tendenziya skorochennya ploschi zelenykh nasadzchen b sviti [The current trend of reducing the area of green spaces in the world]. *Suchasni tehnologii materialy i konstrukzii v budivnytvi* [Modern technologies, materials and structures in construction], 2, 6–9 [in Ukrainian].

Rogovsky, S.V., & Dragan, G.I. (2009). Zahody borotby z minuyuchoyu millyu yak schkidnyka girkokashtana zvychnaynogo v umovah lisostepu Ukrainy [Measures to combat the mining moth as a pest of common horse chestnut in the forest-steppe conditions of Ukraine]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho lisotekhnichnoho universytetu Ukrainy* [Scientific Bulletin of the National Technical University of Ukraine], 19, 26–33. <https://doi.org/10.36495/PHSS.2024.70.48-71> [in Ukrainian].

Trybel, S.O., Gamanova, O.M., & Sventoslavsky, Y. (2008) Kashtanova minuyucha mol [Chestnut mining moth]. Kyiv : Koloobig [in Ukrainian].

EU to fully ban neonicotinoid insecticides to protect bees | Reuters (2018). [Electronic resource] URL: <https://www.reuters.com/article/markets/commodities> (access date 18.03.25) [in English].

Ferreira, J.A., Esparraguera, L.B., Queiroz, S.C., & Bottoli, C. B. (2023). Vegetative Endotherapy–Advances, Perspectives, and Challenges. *Agriculture*, 13 (7), 1–28. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071465> [in English].

Pavan, F., Barro, P., & Dernadinell, I. (2003). Cultural control of *Cameraria ohridella* on horsechestnut in urban areas by removing fallen leaves in autumn. *Arboriculture*, 29, 253–258. <https://doi.org/10.48044/jauf.2003.029> [in English].

Straw, N.A., & Williams, D.T. (2013). Impact of the leaf miner *Cameraria ohridella* (Lepidoptera: Gracillariidae) and bleeding canker disease on horse-chestnut: direct effects and interaction. *Agricultural and Forest Entomology*, 15 (3), 321–333. <https://doi.org/10.1111/afe.12020> [in English].

Walczak, U., Mickiewicz, A., & Giertych, M., (2024). Persistence of imidacloprid in trunk injected horse chestnut and its impact on *Cameraria ohridella* (Lepidoptera: Gracillariidae). *Applied Entomology and Zoology*, 59 (2), 203–210. [Electronic resource] URL: <https://link.springer.com/journal> (access date 06.03.2025) [in English].

Отримано: 23.04.2025
Прийнято: 15.05.2025

ЗМІСТ

БІОЛОГІЯ

Н. К. Гойванович, С. С. Монастирська, С. Я. Волошанська, Я. В. Лесик. Дослідження активності антиоксидантних ензимів деяких видів лікарських рослин Передкарпаття.....	7
А. П. Горальський, Н. В. Демус, І. М. Сокульський, Б. В. Гутий, О. В. Павлюченко, С. Ю. Шевчук. Особливості морфології печінки строкатого товстолобика (<i>Hypophthalmichthys nobilis</i>).....	16
А. П. Горальський, І. В. Цанько, Б. В. Гутий, Н. А. Колеснік. Гістоморфологія легень кларієвого сома (<i>Clarias gariepinus</i>).....	34
Н. В. Григорова. Динаміка вмісту цинку, магнію та міді в клітинах тимуса тварин за умов введення сульфатів цих металів	53
Т. І. Івусь, Ю. О. Карпенко. Систематична структура флори водних та прибережно-водних екосистем малих річок пониззя Десни.....	61
В. Ю. Мамченко, О. В. Павлюченко, О. В. Ішук, І. І. Ковальчук, М. М. Світельський, М. В. Слюсар. Біологічні особливості, потреба в поживних речовинах та техніка годівлі норок.....	69

ГЕОГРАФІЯ

В. М. Воловик, Т. В. Андрійчук, О. М. Цілик, Р. П. Власенко, В. С. Костюк. Геоекологічна ситуація на території Житомирської області: аналіз даних за період 2019–2024 рр.....	77
В. В. Федонюк, С. О. Пугач, М. А. Федонюк. Динаміка міського острова тепла над Луцьком протягом 2013–2023 років.....	89

ХІМІЯ

О. І. Аксіментьєва, Ю. Б. Марків, О. І. Конопельник, Н. Ю. Журіна. Розроблення чутливих елементів оптичних сенсорів для виявлення органічних амінів на забруднених територіях.....	102
Р. А. Вахітов, В. І. Шологон, Н. А. Таран, К. В. Калафат, В. І. Бессарабов, А. М. Вахітова. Дослідження вогнезахисних властивостей інтумесцентних рулонних покриттів.....	111
Н. П. Квітковська, В. М. Іщенко, О. В. Кочубей-Литвиненко, М. В. Іщенко. Вплив термообробки молока на рівноваги за участю іонного кальцію та фосфат-іонів.....	122
О. В. Кочубей, Н. Ю. Душечкіна. Інноваційні технології у виробництві та застосуванні неорганічних речовин.....	131
Н. В. Кусяк, К. П. Свиридюк, О. Ю. Кичкирук, В. В. Листван, П. П. Горбик. Кислотно-основні властивості поверхні нанорозмірного Fe_3O_4	138
Ю. Ю. Петруша, І. М. Сохрякова, В. М. Повзло. Вплив водних вилучень із рослинної сировини на антикорозійну стійкість металів у кислому середовищі.....	146

АГРОНОМІЯ

О. О. Вінюков, О. Б. Лапко, О. Б. Бондарева. Формування показників продуктивності рослинами пшениці озимої різних різновидів залежно від норм висіву в умовах Північного Степу України.....	155
Т. І. Дмитраш, Я. Я. Григорів. Вплив елементів технології на особливості вирощування сіди багаторічної в умовах Західного регіону України	163
Г. Є. Киричук, М. М. Світельський, О. В. Ішук, В. З. Панчишин. Вплив мінеральних добрив на продуктивність оману високого <i>Inula helenium</i> L. в умовах Полісся України	171
Ю. М. Кононенко. Аналіз вірулентності збудника <i>Blumeria graminis</i> f. sp. <i>hordei</i> та ефективність генів стійкості ячменю.....	182
К. С. Небаба. Симбіотична продуктивність гороху ярого залежно від агротехнічних чинників в умовах Лісостепу Західного.....	193

В. З. Панчишин, А. А. Мелешко, Н. І. Корево, С. В. Можаровський, І. А. Журавська. Симбіотична активність бактерій роду <i>Bradyrhizobium</i> на рослинах <i>Glicine hispida</i> залежно від досліджуваних факторів.....	200
О. В. Пилипенко. Вплив рівня вологозабезпечення і площі живлення на структуру врожаю сої та їх значення для насінництва.....	211
І. В. Свистунова, М. В. Захлебасєв, С. П. Полторецький, А. М. Шувар, І. І. Сеник, Л. М. Баліцька. Вплив технологічних заходів вирощування на видовий та хімічний склад травостою бінарних посівів буркуну білого зі злаковими культурами	222
А. А. Сітник. Особливості формування продуктивності сорго цукрового в умовах Західного регіону України.....	232
Р. О. Турак. Продуктивність соняшнику залежно від системи удобрення в умовах Західного регіону України.....	240
Ю. О. Турак, Я. Я. Григорів. Продуктивність гібридів кукурудзи залежно від системи удобрення в Західному регіоні України.....	248
Я. Г. Цицюра. Ефективність комплексного застосування сидератів із біодобривами за вирощування кукурудзи на зерно.....	257
А. В. Шепель. Продуктивність сортів пшениці озимої залежно від рівня азотного підживлення на Півдні України.....	270
О. Є. Ярмольська, О. А. Барсукова, Е. В. Натальченко. Агроєкологічні показники формування потенційного врожаю сочевиці.....	278

ЕКОЛОГІЯ

Е. О. Бутенко, О. Є. Капустін. Шаруваті подвійні гідроксиди як сорбенти для доочищення природних вод від нафтопродуктів: сучасний стан та перспективи застосування.....	288
О. М. Василенко, І. П. Онищук. Вплив техногенного забруднення на ґрунти санітарно-захисних зон промислових підприємств міста Житомира.....	298
О. М. Василенко, І. В. Хом'як, В. І. Тіт. Моделювання динаміки асоціації <i>Dicrano-Pinetum</i> на території Житомирського Полісся.....	309
О. В. Гарбар, С. В. Жеревко, А. І. Ворончук, Д. А. Гарбар. Оцінка перспектив поширення <i>Opuntia humifusa</i> Raf., 1820 у Європі в умовах глобальних змін клімату.....	320
Я. В. Горишнякова. Оцінка інтенсивності впливу кар'єрного відпрацювання Межирічного родовища титанових розсіпів на підземні води.....	332
К. В. Григор'єв, А. І. Григор'єва. Радіоактивні опади в атмосфері та їх радіоекологічний моніторинг у контексті військових дій.....	344
Н. Ю. Душечкіна. Системний аналіз якості довкілля як інструмент екологічного управління.....	353
Ю. О. Карпенко, В. О. Сverdлов. Реалізація цілей сталого розвитку в акценті на регіональні екологічні проблеми.....	361
О. В. Коляда, Г. В. Коробкова, В. П. Коляда. Аналіз та моделювання фітотоксичності чорноземного ґрунту забрудненого нафтопродуктами.....	371
Л. Б. Ящук. Перспектива використання біохімічних препаратів у боротьбі зі шкідниками деревних рослин у міських умовах.....	379

НОТАТКИ