

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка

СЛОБОЖАНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК

Серія: Природничі науки

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Випуск 2, 2025



Видавничий дім
«Гельветика»
2025

Засновник – Сумський державний педагогічний університет імені А.С. Макаренка
Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа: Рішення Національної ради України
з питань телебачення і радіомовлення № 479 від 29.02.2024 року
(ідентифікатор медіа: R30-03338)

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Сумський державний педагогічний університет імені А.С. Макаренка
(вул. Роменська, буд. 87, м. Суми, 40002, gestor@sspu.edu.ua, тел. (0542) 68-59-02)

Фахова реєстрація (категорія «Б»):

Наказ МОН України № 491 від 27 квітня 2023 року (додаток 3);

Наказ МОН України № 768 від 20 червня 2023 року (додаток 3)

Галузь знань: біологія; природничі науки

Спеціальності: Е1 Біологія та біохімія, Е2 Екологія, Е4 Науки про Землю, С6 Географія та регіональні студії

Друкується згідно з рішенням вченої ради
Сумського державного педагогічного університету імені А.С. Макаренка
(Протокол № 3 від 27.10.2025 р.)

Головний редактор:

Корнус А. О. – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри загальної та регіональної географії Сумського державного педагогічного університету імені А.С. Макаренка

Члени редакційної колегії:

Бенселгуб Аїсса (Benselhoub Aissa) – доктор філософії з екології та охорони навколишнього середовища, кандидат сільсько-господарських наук, науковий співробітник, Віденський університет, Австрія

Буц Ю. В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри охорони праці та навколишнього середовища, Український державний університет залізничного транспорту, Україна

Буяновський А. О. – кандидат географічних наук, доцент, завідувач кафедри географії України, ґрунтознавства і земельного кадастру, Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, Україна

Вакал А. П. – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри біології та методики навчання біології, Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Україна

Говорун О. В. – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри біології та методики навчання біології, Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Україна

Данильченко О. С. – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри загальної та регіональної географії, Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Україна

Елізбарашвілі Нодар (Elizbarashvili Nodar) – доктор географічних наук, професор, завідувач кафедри географії Грузії та ландшафтного планування, Тбіліський державний університет імені Іване Джавахішвілі, Грузія

Іванов Є. А. – доктор географічних наук, професор, завідувач кафедри конструктивної географії і картографії, Львівський національний університет імені Івана Франка, Україна

Карачоні Девід (Karacsonyi David) – доктор філософії, доцент, викладач-дослідник / дослідник-ад'юнкт в Північному інституті, Університет Чарльза Дарвіна, Австралія

Ковальчук О. М. – доктор біологічних наук, старший дослідник, провідний науковий співробітник, Національний науково-природничий музей НАН України, Україна

Коцьчик Йоанна (Kończuk Joanna) – доктор хімічних наук, доцент, доцент Інституту хімії науково-технологічного факультету, Університет Яна Длугоша в Ченстохові, Республіка Польща

Корнус О. Г. – кандидат географічних наук, доцент, завідувач кафедри загальної та регіональної географії, Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Україна

Кравцова І. В. – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри екології та безпеки життєдіяльності, Уманський національний університет, Україна

Круподьорова Т. А. – доктор біологічних наук, старший науковий співробітник, Державна установа «Інститут харчової біотехнології та геноміки Національної академії наук України», Україна

Литвиненко Ю. І. – кандидат біологічних наук, доцент, завідувач кафедри біології та методики навчання біології, Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Україна

Паланг Ханнес (Palang Hannes) – доктор філософії, доцент, керівник Центру ландшафту та культури, Талліннський університет, Естонія

Севіндік Мустафа (Sevindik Mustafa) – доктор філософії, доцент, доцент кафедри біології, факультету інженерії та природничих наук, Університет Османіє Коркут Ата, Туреччина

Торяник В. М. – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри біології та методики навчання біології, Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Україна

Хамідреза Рабей-Дастжерді (Hamidreza Rabiei-Dastjerdi) – доктор філософії, доцент кафедри географії, Університет Дубліна, Ірландія

Холявчук Д. І. – доктор географічних наук, доцент, доцент кафедри фізичної географії, геоморфології та палеогеографії, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Україна

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

Мови видання: українська, англійська, німецька, польська, іспанська, французька, болгарська.

ISSN 2786-8117 (Print)

ISSN 2786-8125 (Online)

© Сумський державний педагогічний університет імені А.С. Макаренка, 2025

ЗМІСТ

1. БІОЛОГІЯ

Бахлуков Дмитро Олександрович, Литвиненко Юлія Іванівна, Круподьорова Тетяна Анатоліївна Ферментація зернобобових харчових круп макроміцетами: сучасний стан досліджень та актуальні тенденції.....	7
Звір Галина Іванівна, Різун Ганна Михайлівна Вплив гербіциду Раундап на азотофіксувальні бактерії роду <i>Azotobacter</i>	16
Литвиненко Юлія Іванівна, Панченко Сергій Михайлович, Говорун Олександр Володимирович Комплексна оцінка біорізноманіття псамофітних лук у прирусловій частині р. Ворскла.....	25
Лукаш Олександр Васильович, Ткачук Наталія Василівна, Янченко Віктор Олексійович Вплив вторинних метаболітів мікроміцетів на ліпідний профіль корошових риб.....	35
Маренков Олег Миколайович, Нестеренко Олег Станіславович, Боровик Іван Ігорович, Гамолін Андрій Володимирович Оцінка промислових запасів і прогноз вилову риб родини окуневі (<i>Percidae</i>) Дніпровського водосховища на 2026 рік.....	42
Матюшко Сергій Миколайович, Любчиков Руслан Євгенійович Активність ферментів вуглеводного обміну у карася звичайного (<i>Carassius carassius</i>) за афлатоксикозу як маркер оцінки токсичності водного середовища.....	48
Мельник-Шамрай Вікторія Вікторівна, Шамрай Володимир Ігорович Агроекологічний стан сільськогосподарських земель Житомирської області: аналітичний огляд та напрями оптимізації.....	54
Симонова Наталія Анатоліївна, Мехед Ольга Борисівна Вплив афлатоксину В1 на інтенсивність перекисного окиснення ліпідів у тканинах карася звичайного.....	65
Фанін Ярослав Сергійович, Молодченкова Ольга Олегівна, Міщенко Лідія Трохимівна, Дуніч Аліна Анатоліївна, Міщенко Іван Анатолійович, Дащенко Анна Валеріївна, Січкач Вячеслав Іванович, Лаврова Галина Дмитрівна Біохімічні показники рослин сої звичайної за інфікування вірусом мозаїки сої.....	70

2. ЕКОЛОГІЯ

Belokon Karina Volodymyrivna, Pirohova Iryna Mykolaivna, Malovanyu Myroslav Stepanovych, Dzyhyrey Iryna Mykolaivna Regulatory framework of regional environmental monitoring in Ukraine: challenges and improvement pathways in the post-war period.....	80
Бусенко Леся Володимирівна, Теплюк Вадим Сергійович, Іванців Володимир Васильович Біоіндикаційна ефективність ґрунтових безхребетних в екосистемах із різним рівнем антропогенного навантаження.....	87

3. ГЕОГРАФІЯ

Байтеряков Олег Зуфарович, Мисько Володимир Зіновійович, Мисько Тетяна Орестівна Формування біогеографічних знань засобами нумізматичної географії: освітній і виховний потенціал монет країн світу.....	101
Корнус Анатолій Олександрович, Корнус Олеся Григорівна, Данильченко Олена Сергіївна, Король Олена Миколаївна, Луценко Сергій Вікторович Транспортна доступність адміністративних центрів Сумської області: просторово-географічний підхід.....	109
Король Олена Миколаївна, Корнус Анатолій Олександрович, Корнус Олеся Григорівна, Данильченко Олена Сергіївна, Луценко Сергій Вікторович ГІС для екотуризму: екологічна оцінка, картографування та освіта.....	116
Маляренко Костянтин Олександрович, Сегіда Катерина Юріївна Суспільно-географічний аналіз економічних трансформацій Харківської області в умовах війни.....	124

Романів Павло Володимирович

Сталий активний туризм в межах Свидовецького масиву: інфраструктурні заходи, безпекові рішення та еколого-географічні пріоритети.....130

4. НАУКИ ПРО ЗЕМЛЮ

Вакал Юлія Сергіївна, Мацак Станіслав Вячеславович, Безбородова Єлизавета Ігорівна

Гідрохімічний склад поверхневих вод м. Охтирка..... 136

Ковальчук Мирон Степанович, Крошко Юлія Володимирівна

Ільменіт з нижньокрейдових континентальних відкладів Андріївського розсипного родовища титанових руд.....143

Легенчук Роман Васильович, Циганенко-Дзюбенко Ілля Юрійович, Скиба Галина Віталіївна,

Капець Надія Володимирівна

Перспективи та технологічні ризики процесу біоконверсії
органомінеральних добрив з мулових відкладів занедбаних меліоративних систем.....151

CONTENT

1. BIOLOGY

Bakhlukov Dmytro, Lytvynenko Yulia, Krupodorova Tetiana Fermentation of Cereals and Legumes by Macromycetes: State of the Art and Current Research Trends.....	7
Zvir Galyna, Rizun Hanna Effect of the herbicide Roundup on nitrogen-fixing bacteria of the genus <i>Azotobacter</i>	16
Lytvynenko Yulia, Panchenko Serhiy, Govorun Oleksandr Psammophilous meadows in the riparian zone of the Vorskla River.....	25
Lukash Oleksandr, Tkachuk Nataliia, Yanchenko Viktor Influence of secondary metabolites of micromycetes on the lipid profile of curly fish.....	35
Marenkov Oleh, Nesterenko Oleh, Borovyk Ivan, Gamolin Andriy Assessment of commercial stocks and forecast of catches of fish of the family Percidae of the Dniпровske Reservoir for 2026.....	42
Matiushko Sergii, Liubchykov Ruslan Carbohydrate metabolism enzyme activity in Crucian carp (<i>Carassius carassius</i>) under aflatoxicosis as a biomarker for aquatic environment toxicity assessment	48
Melnyk-Shamrai Viktoriia, Shamrai Volodymyr Agroecological state of agricultural lands in Zhytomyr region: an analytical review and optimization directions.....	54
Symonova Nataliia, Mekhed Olha Influence of aflatoxin B1 on the intensity of lipid peroxidation in curb tissues.....	65
Fanin Yaroslav, Molodchenkova Olha, Mishchenko Lidiia, Dunich Alina, Mishchenko Ivan, Dashchenko Anna, Sichkar Viacheslav, Lavrova Halyna Biochemical indicators of common soybean plants infected with soybean mosaic virus.....	70

2. ECOLOGY

Belokon Karina, Pirohova Iryna, Malovanyy Myroslav, Dzhygyrey Iryna Regulatory framework of regional environmental monitoring in Ukraine: challenges and improvement pathways in the post-war period.....	80
Buslenko Lesia, Tepliuk Vadym, Ivantsiv Volodymyr Bioindicative Efficiency of Soil Invertebrates in Ecological Systems with Different Levels of Anthropogenic Load.....	87

3. GEOGRAPHY

Bayteryakov Oleh, Mysko Volodymyr, Mysko Tetiana The formation of biogeographical knowledge by means of numismatic geography: educational and pedagogic potential of coins of the world.....	101
Kornus Anatolii, Kornus Olesia, Danylchenko Olena, Korol Olena, Lutsenko Serhii Transport Accessibility of Administrative Centres in Sumy Oblast: A Spatial-Geographical Approach.....	109
Korol Olena, Kornus Anatolii, Kornus Olesia, Danylchenko Olena, Lutsenko Serhii GIS for Ecotourism: Environmental Assessment, Mapping, and Education.....	116
Maliarenko Kostiantyn, Sehida Kateryna Human-geographical features of economic transformations in the Kharkiv region.....	124
Romaniv Pavlo Sustainable active tourism within the Svydovetsky massif: infrastructure measures, security solutions and ecological-geographical priorities.....	130

4. EARTH SCIENCES

Vakal Yuliia, Matsak Stanislav, Bezborodova Yelyzaveta Hydrochemical composition of surface waters of Okhtyrka city.....	136
Kovalchuk Myron, Kroshko Yuliia Ilmenite from the lower cretaceous continental deposits of the Andriyivsky placer deposit of titanium ores.....	143
Lehenchuk Roman, Tsyhanenko-Dziubenko Illia, Skyba Halyna, Kapets Nadiia Prospects and technological risks of the bioconversion process of organo-mineral fertilizers from sludge deposits of neglected reclamation systems.....	151

1. БІОЛОГІЯ

УДК 577.175:633.16:66.061.6

DOI <https://doi.org/10.32782/naturalspu/2025.2.1>

ФЕРМЕНТАЦІЯ ЗЕРНОБОБОВИХ ХАРЧОВИХ КРУП МАКРОМІЦЕТАМИ: СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ТА АКТУАЛЬНІ ТЕНДЕНЦІЇ

Бахлуков Дмитро Олександрович,

аспірант

відділ рослинних харчових продуктів та біофортificaція

Державна установа «Інститут Харчової біотехнології та Геноміки НАН України»

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9394-7436>

Литвиненко Юлія Іванівна,

кандидат біологічних наук, доцент

завідувач кафедри біології та методики навчання біології

Сумського державного педагогічного університету імені А. С. Макаренка

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9095-0437>

Scopus Author ID: 57204771998

Web of Science Researcher ID: HKV-8087-2023

Круподьорова Тетяна Анатоліївна,

доктор біологічних наук, старший науковий співробітник

відділ рослинних харчових продуктів та біофортificaція

Державна установа «Інститут Харчової біотехнології та Геноміки НАН України»

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4665-9893>

Scopus Author ID: 55545626900

Web of Science Researcher ID: HPH-1186-2023

У статті узагальнено новітні дані щодо актуальності та сучасного стану досліджень ферментації харчових круп макроміцетами. У цьому нарративному огляді систематизовано результати ферментації бобових (соеві боби, сочевиця, квасоля), зернових (рис, пшениця, ячмінь, овес, сорго, кукурудза) та псевдозернових (кіноа), здійсненої їстівними й лікарськими видами макроміцетів: *Ganoderma lucidum*, *Grifola* spp., *Hericiium* spp., *Lentinula edodes*, *Irpex lacteus*, *Pleurotus ostreatus*. Підкреслено роль макроміцетів як біотехнологічного інструмента, що дозволяє модифікувати харчові крупи, підвищувати їх біодоступність та збагачувати їх корисними біоактивними сполуками. Особлива увага приділена аналізу змін у хімічному складі ферментованих продуктів, включно зі збільшенням вмісту амінокислот, біологічно активних пептидів, ферментів та антиоксидантних сполук. Обговорено потенційні переваги ферментації макроміцетами для покращення поживної цінності та смакових якостей круп, а також пов'язані з цим потенційні ризики. Окремо розглянуто технології ферментації з використанням макроміцетів та наведено стислий аналіз твердофазної та глибинної ферментації, їхніх переваг, обмежень, умов проведення й перспективних інновацій для підвищення ефективності та промислової масштабованості процесів.

Наведені результати свідчать про перспективність застосування макроміцетів для створення функціональних харчових продуктів і нутрицевтиків, які відповідають принципам інноваційності, сталого розвитку та сучасних трендів здорового харчування. Стаття узагальнює новітні дані щодо біотехнологічного потенціалу макроміцетів і може слугувати як теоретичною та методологічною основою для подальших експериментальних досліджень та підтримки для розроблення нових напрямів їхнього практичного застосування у харчових технологіях.

Ключові слова: ферментація, зернові крупи, бобові культури, макроміцети, біосинтетична активність.

Bakhlukov Dmytro, Lytyynenko Yulia, Krupodorova Tetiana. Fermentation of Cereals and Legumes by Macromycetes: State of the Art and Current Research Trends

The article summarizes the latest data on the relevance and current state of research on cereal fermentation by macromycetes. This narrative review systematizes the results of fermentation of legumes (soybeans, lentils, beans), cereals (rice, wheat, barley, oats, sorghum, maize), and pseudocereals (quinoa) carried out by edible and medicinal species of macromycetes: *Ganoderma lucidum*, *Grifola* spp., *Hericiium* spp., *Lentinula edodes*, *Irpex lacteus*, *Pleurotus ostreatus*. The role of macromycetes as a biotechnological tool that enables the modification of cereals, enhances their bioavailability, and enriches them with beneficial bioactive compounds is emphasized. Particular attention is paid to the analysis of changes in the chemical composition of fermented products, including the increase in amino acids, bioactive peptides, enzymes, and antioxidant compounds. The potential advantages of cereal fermentation by macromycetes for improving nutritional value and sensory properties, as well as the associated potential risks, are discussed.

Fermentation technologies using macromycetes are considered separately, with a concise analysis of solid-state and submerged fermentation, their benefits, limitations, process conditions, and promising innovations for improving efficiency and industrial scalability.

The presented results highlight the prospects of applying macromycetes for the development of functional foods and nutraceuticals that align with the principles of innovation, sustainability, and modern healthy nutrition trends. The article generalizes the latest data on the biotechnological potential of macromycetes and may serve both as a theoretical and methodological foundation for further experimental research and as a basis for developing new directions of their practical application in food technologies.

Key words: fermentation, cereals, legumes, macromycetes, biosynthetic activity.

Вступ. Збереження здоров'я та підвищення захисних сил організму є одними з ключових проблем людства, що залишаються актуальними завжди. Протягом останніх трьох десятиліть спосіб життя та харчові звички людей кардинально змінилися. Ці зміни були зумовлені процесами урбанізації та трансформацією споживчих настроїв, що призвело до масового зростання вживання синтетичних харчових продуктів і, як наслідок, зростання поширеності захворювань, пов'язаних зі способом життя. Економічні, соціальні та екологічні проблеми в Україні негативно впливають на якість та структуру харчування. Особливо гостро ця проблема проявляється сьогодні, враховуючи повномасштабну війну з постійними сигналами повітряної тривоги, бомбардуваннями та ракетними обстрілами. Поряд із цим, стрімке зростання числа людей, що дотримуються веганського способу життя [1], та підвищення обізнаності населення щодо здорового харчування [2] орієнтують увагу споживачів на функціональні продукти харчування та напої.

Сучасні тенденції розвитку харчової промисловості та наукові дослідження демонструють значний інтерес до створення продуктів, які входять у щоденний раціон людини та впливають на біохімічні реакції й фізіологічні функції організму [3]. У 2024 році обсяг світового ринку ферментованих продуктів становив 247,11 млрд дол. США. За прогнозами, він зросте з 258,97 млрд дол. США у 2025 році до приблизно 394,91 млрд дол. США у 2034 році, що відповідає середньорічному темпу зростання (CAGR) 4,80% у період 2025–2034 років [4]. У зв'язку з цим останніми роками спостерігається тенденція зростання досліджень, спрямованих на створення нових продуктів із високою харчовою та біологічною цінністю, здатних підвищувати функціональні ресурси організму, його працездатність, якість життя та стійкість до факторів зовнішнього середовища. Характеристики таких продуктів можуть відрізнятися, а назви, що їх застосовують у різних країнах (функціональні продукти харчування, продукти спеціального або дієтичного призначення тощо), не впливають на їх значення та роль.

Однією з перспективних стратегій створення таких продуктів є ферментація за участю мікроорганізмів, зокрема бактеріями, дріжджами та мікроміцетами, що детально узагальнено в численних оглядах [5; 6; 7; 8; 9]. Макроміцети, завдяки високому ферментативному потенціалу та здатності синтезувати цінні метаболіти, розглядаються як перспективний об'єкт для створення інноваційних харчових продуктів із підвищеною поживною та функціональною цінністю і нутрицевтиків [10]. Водночас наразі бракує систематизованих даних щодо процесів ферментації з їх використанням, що обумовлює актуальність проведеного дослідження та необхідність узагальнення сучасних знань у цій галузі.

Таким чином, **метою** дослідження є проведення комплексного аналізу сучасного стану наукових досліджень і технологічних рішень, пов'язаних із ферментацією зернобобових харчових круп за участю макроміцетів, а також оцінка перспектив впровадження цих підходів у харчову промисловість з урахуванням безпечності, ефективності та інноваційного потенціалу.

Методологія та підхід до збору і аналізу інформаційних джерел. Представлений огляд є нарративним і базується на якісному аналізі джерел з оцінкою їх відповідності тематиці дослідження. Інформаційний пошук здійснювався у провідних міжнародних наукометричних базах (Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect, SpringerLink, MDPI) та патентних ресурсах (Espacenet, WIPO Patentscope) протягом різних років, із фокусом на останні 15 років для отримання актуальної інформації.

До аналізу залучалися рецензовані статті, патенти та наукові огляди, які безпосередньо стосуються застосування макроміцетів у технологіях ферментації харчових продуктів або створення функціональних інгредієнтів. Використовувалися релевантні ключові слова, зокрема: макроміцети, твердофазна ферментація, занурена ферментація, харчові продукти, функціональні інгредієнти, ферментативний потенціал, біоактивні сполуки, безпечність харчових продуктів, omics-технології, генетична інженерія, автоматизація біопроектів.

Огляд сфокусований на узагальненні сучасних даних щодо процесів ферментації харчових круп. Харчові крупи класифіковано відповідно до їхнього призначення як крупи або сировину для їх виробництва, із поділом за ботанічними групами: бобові (соеві боби, сочевиця, квасоля), зернові (рис, пшениця, ячмінь, овес, сорго, кукурудза) та псевдозернові (кіноа). Така класифікація забезпечує систематизацію даних щодо їх ферментації макроміцетами.

Пошук і відбір джерел обмежено тематикою ферментації харчових круп макроміцетами та не охоплює дослідження, присвячені ферментації інших органічних субстратів.

Результати та обговорення. У цьому розділі подано огляд сучасних досліджень щодо ферментації харчових круп макроміцетами та їхнього впливу на функціональні властивості продуктів. Представлені результати охоплюють біологічні особливості макроміцетів, технологічні підходи до ферментації, ферментативний потенціал конкретних видів, а також ключові проблеми та перспективи розвитку цієї галузі.

Біологічні особливості макроміцетів у контексті ферментації. Макроміцети – це вищі гриби, що утворюють помітні великі (≥ 1 см) плодові тіла (спорокарпи або карпофори), видимі неозброєним оком. Ці структури складаються з розгалужених септованих

гіф. Таксономічно макроміцети переважно належать до підцарства Dikarya, зокрема до відділів Ascomycota та Basidiomycota, разом налічують понад 30 000 видів [11]. Деякі представники належать до групи, раніше відомої як Zygomycota. Значна частина макроміцетів є потенційним джерелом різноманітних первинних та вторинних біологічно активних метаболітів, включно з полісахаридами, білками, амінокислотами, жирними кислотами, лектинами, терпеноїдами, фенольними сполуками, нуклеїновими кислотами, нуклеозидами, пептидами, стероїдами тощо [12]. Ці сполуки можна виділяти як із міцелію, так і з плодових тіл грибів або із культурального середовища.

В огляді Сяоці Сун (X. Sun) та співавт. [13] узагальнено дані щодо понад 270 природних сполук, синтезованих представниками 17 родин макроміцетів у період 2017–2023 рр., із наведенням їхніх структур, біологічної активності та відповідних молекулярних механізмів дії. Різноманітні біологічно активні речовини макроміцетів обумовлюють значний терапевтичний потенціал з широким спектром дії (загалом 130 різних біологічних активностей), серед яких особливе значення мають імуномодулювальна, протипухлинна, антивірусна, антибактеріальна, антиоксидантна, гепатопротекторна, гіпохолестеринемічна та гіпоглікемічна дії. Це відкриває широкі перспективи для практичного застосування макроміцетів у сучасній біотехнології, харчовій промисловості, медицині, фармакології та фунготерапії.

Зростаючі інвестиції в харчову промисловість і виробництво продуктів на основі грибів стимулюють попит і сприяють розширенню ринку. Паралельно з цим, із підвищенням обізнаності споживачів про здоровий спосіб життя, дієти, багаті на білки, набули значної популярності.

Макроміцети характеризуються високим ферментативним потенціалом, що зумовлює їхню здатність ефективно розщеплювати широкий спектр полімерних субстратів харчового походження. Вони синтезують численні гідролітичні ферменти [14], зокрема амілази, протеази, целулази, ліпази та інші біокатализатори, які забезпечують перетворення вуглеводів, білків, целюлозних та ліпідних компонентів на більш доступні й функціонально активні форми. Завдяки цьому ферментація за участю макроміцетів покращує поживну та сенсорну цінність харчових продуктів.

До спектру метаболітів вторинного ряду, що мають значну харчову та фармакологічну цінність, належать полісахариди, терпенові та фенольні сполуки, стероїдні деривати, алкалоїди та інші біологічно активні молекули, які проявляють антиоксидантні, імуномодулювальні, протизапальні й антимікробні властивості [15]. У процесі ферментації ці метаболіти можуть накопичуватися у «харчовій матриці» або модифікувати її хімічний склад, підвищуючи функціональні властивості готового продукту. Таким чином, макроміцети розглядаються не лише як біокатализатори перетворення поживних речовин, а й як джерело сполук, здатних надавати ферментованим харчовим продуктам додаткові профілактичні та терапевтичні ефекти.

Технології ферментації з використанням макроміцетів. У сучасних технологіях ферментації з використанням макроміцетів застосовують два основні підходи: твердофазна та глибинна ферментація, які характеризуються специфічними умовами проведення, технологічними особливостями та власними перевагами й обмеженнями [15].

Твердофазна ферментація (Solid State Fermentation, SSF) базується на вирощуванні грибів на твердих субстратах із низьким вмістом вологи, що імітують природні умови їхнього розвитку. Як сировина переважно використовують зернові та агропромислові відходи – злакові висівки, лушпиння бобових культур, тирсу, стебла кукурудзи та інші лігноцелюлозні матеріали, що забезпечує економічну доцільність і екологічну привабливість процесу. Перевагами цього методу є простота технологічної схеми, висока концентрація цільових продуктів і мінімальні вимоги до стерильності. Водночас до обмежень належать складність контролю вологості та температури, нерівномірність розвитку міцелію, а також обмежені можливості масштабування процесу.

Глибинна ферментація (Submerged Fermentation, SmF) передбачає культивування макроміцетів у рідких поживних середовищах із постійною аерацією та перемішуванням, що забезпечує рівномірний розподіл поживних речовин та контроль ключових параметрів процесу – температури, рН, концентрації розчиненого кисню, або проводиться за статичних умов. Такий підхід дозволяє досягати високої продуктивності та інтенсивного накопичення ферментів і біоактивних метаболітів, а також спрощує виділення цільових продуктів із культуральної рідини. Водночас SmF потребує складнішого обладнання, суворої стерильності та вищих енергетичних витрат порівняно з твердофазною ферментацією.

Порівняльний аналіз SSF і SmF показує, що вибір методу залежить від типу макроміцета, характеру цільового продукту та економічних умов виробництва.

Сучасні інновації у сфері ферментаційних технологій, зокрема застосування біореакторів зі спеціалізованими мішалками, датчиками та системами автоматичного регулювання, а також інтеграція цифрових технологій моніторингу, дозволяють підвищувати стабільність процесу, ефективно керувати біосинтетичною активністю грибів та адаптувати умови культивування до промислових масштабів [11; 16; 17]. Це відкриває перспективи створення стандартизованих, високопродуктивних та економічно ефективних технологій отримання харчових інгредієнтів і функціональних продуктів із використанням макроміцетів.

Види макроміцетів і їх біотехнологічний потенціал для ферментації зернобобових харчових круп.

Ферментація із залученням макроміцетів є контрольованим ферментативним процесом трансформації органічної сировини, під час якого складні та важко перетравлювані сполуки перетворюються на харчові компоненти з підвищеною біодоступністю, одночасно зменшуючи вміст антинутрієнтів. З цієї причини ферментовані пробіотичні соєві продукти, такі як місо,

темпе, тамарі або натто, містять низький рівень антинутриєнтів. Білкові ферментовані соєві продукти, зокрема темпе, місо та натто, які традиційно були основою кухні феодальної Японії, сьогодні набувають широкої популярності в інших країнах.

До перспективних видів макроміцетів, залучених до ферментації бобових культур, належить *Irpex lacteus* (Fr.) Fr. Цей вид показує значний потенціал у перетворенні паростків соєвих бобів: встановлено підвищення антиоксидантної активності у 2–8 разів, зростання вмісту фенольних сполук у 4–5 разів та флавоноїдів у 8–9 разів [18]. Крім того, зафіксовано збільшення концентрації вільних амінокислот та β -глюканів у ферментованих паростках [19].

Серед їстівних базидіоміцетів варто відзначити *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm., ефективність якого продемонстрована у твердофазній ферментації сочевиці. За даними Андреа Асенсіо-Грау (A. Asensio-Grau) та співавт. [20], проведена ферментація підвищує вміст білка (на 23%), резистентного крохмалю (на 9,8%) і поліфенолів (із 2,1 до 3,2 мг еквіваленту галлової кислоти/г). Після моделювання *in vitro* було також зафіксовано зростання частки перетравленого білка на 17%, зниження гідролізу крохмалю (24% проти 34%) та збільшення поліфенолів (із 3,1 до 7,73 мг/г).

Використання *Pleurotus ostreatus* також у процесах твердофазної ферментації показало високу ефективність у покращенні харчового профілю сочевиці та білої кіноа. Зокрема, спостерігалось підвищення загального вмісту білка на 20–25 % у більшості зразків (за винятком сочевичного борошна), при цьому частка розчинного білка залишалася відносно стабільною [21]. Одночасно відзначалось поступове зниження вмісту фітинової кислоти, причому цей ефект був більш вираженим у борошні порівняно з насінням. Автоклавування субстратів сприяло вивільненню поліфенолів і підвищенню антиоксидантної активності (ABTS, DPPH, FRAP), однак у ході ферментації ці показники знижувалися. Такі результати формують наукове підґрунтя для створення інгредієнтів на основі сочевиці та кіноа зі зниженим вмістом антинутриєнтів і додатковим збагаченням білковою грибною біомасою.

Ферментація квасолі звичайної, квасолі чорної та вівса міцелієм *Pleurotus ostreatus* продемонструвала суттєве підвищення їхньої харчової та біологічної цінності. Зокрема, антиоксидантна активність зросла на 39,5% у квасолі звичайній та на 225% у вівсі, а загальний вміст поліфенолів у бобах квасолі збільшився утричі. Також зафіксовано значний приріст засвоюваності білків (з 39,99 до 48,13% у чорній квасолі, з 44,06 до 69,01% у квасолі звичайній та з 63,25 до 70,01% у вівсі) і зниження вмісту дубильних речовин (з 65,21 до 22,07 мг у чорній квасолі, з 35,54 до 23,37 мг у квасолі звичайній та з 55,67 до 28,11 мг у вівсі) [22].

Поряд із зазначеними видами, перспективними у ферментації бобових культур виявилися й інші базидієві гриби. Зокрема, соєві боби, ферментовані міцелієм *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst., містили ізофлавоновий аглікон з антиангіогенною активністю [23].

В іншому дослідженні було отримано ферментовані соєві боби за участю *G. lucidum*, *Hericium erinaceus* (Bull.) Pers. та *H. ramosum* (Bull.) Letell., які характеризувалися збагаченим вмістом поліфенолів і вираженою антиоксидантною дією [24]. Також встановлено, що міцелій *G. lucidum* забезпечує швидший перебіг ферментації порівняно з *H. erinaceus* та *H. ramosum*. Загальний вміст фенольних сполук у неферментованих соєвих бобах та у бобах, ферментованих відповідно міцелієм *G. lucidum*, *H. erinaceus* і *H. ramosum*, становив $1,547 \pm 0,068$; $2,304 \pm 0,035$; $2,074 \pm 0,066$ та $2,160 \pm 0,014$ мг/г сухого порошку. Показники радикал-поглинальної активності (DPPH) для тих самих зразків дорівнювали відповідно $1,847 \pm 0,073$; $4,246 \pm 0,010$; $2,246 \pm 0,061$ і $2,367 \pm 0,173$ мкмоль тролокса/г сухого порошку. Крім того, серед 28 досліджених видів базидієвих грибів, найвищий рівень гідролізу пшеничної клітковини (63%) – як складного субстрату для Коджі (Koji, традиційного продукту азійської кухні) – було зафіксовано у *Flammulina velutipes* (Curtis) P. Karst. за умов статичного росту у поверхневій культурі [25].

Ряд досліджень присвячено ферментації рису, зокрема різновиду Riceberry (*Oryza sativa* L.), для підвищення його харчової та функціональної цінності [26; 27]. Пророщування та подальша ферментація цього різновиду рису міцелієм *Pleurotus ostreatus* сприяють зростанню вмісту γ -аміномасляної кислоти (GABA) та β -глюкану, а також покращують пребіотичні властивості порівняно з непророщеним зерном. Такі продукти розглядаються як перспективні харчові інгредієнти для підтримки здоров'я травної системи, зокрема у людей літнього віку.

Додатково встановлено, що пророщування та ферментація рису міцелієм *P. ostreatus* підвищують вміст GABA, антоціанів та інших біоактивних сполук; при цьому максимальна концентрація GABA ($38,58 \pm 0,29$ мг/100 г) була зафіксована у пророщеному рисі, ферментованому цим видом грибів [27].

Ферментація рисового борошна з використанням міцелію *Trametes versicolor* (L.) Lloyd стимулювала утворення біоактивних сполук із вираженою імуномодулюючою активністю: активацією імунних клітин та підвищенням секреції про- й протиzapальних цитокінів [28]. Водні та тверді фракції міцелію індукували сильну експресію активаційного маркера CD69 на лімфоцитах і моноцитах, тоді як ферментований субстрат мав помірний ефект, а вихідний субстрат залишався неактивним. Обидві фракції ферментованого субстрату сприяли дозозалежному зростанню продукції протизапальних (IL-2, IL-6, IL-1ra, IL-10), противірусних (IFN- γ , MIP-1 α) цитокінів, а також G-CSF та IL-8, тоді як міцелій викликав менш виражену відповідь.

Міцелій *Hericium erinaceus*, вирощений на суміші червоного та білого жасминового рису методом твердофазної ферментації, проявив антибактеріальні властивості завдяки наявності в ліпофільній фракції похідних жирних кислот (зокрема нонанової кислоти та етилового ефіру лінолевої кислоти), активних проти *Proteus mirabilis* (MIC = 250 мкг/мл) [29]. Водночас антипролі-

феративна активність щодо клітин шийки матки (HeLa) була низькою ($IC_{50} > 100$ мкг/мл). Отримані результати вказують на перспективність використання ферментованого рису з *H. einaeus* як джерела природних антибактеріальних інгредієнтів.

Твердофазна ферментація пшениці міцелієм *Grifola frondosa* (Dicks.) Gray, *G. gargal* (Singer) та *G. sordulenta* (Mont.) Singer дозволяє отримати борошно з істотно підвищеною антиоксидантною активністю [30]. Біотрансформація супроводжується зростанням вмісту фенольних сполук та значним посиленням радикал-знешкоджувальної здатності й відновної активності порівняно зі звичайним пшеничним борошном. Зокрема, у борошні, отриманому з використанням *G. frondosa*, вміст антиоксидантів досягав 193,67 мг/г у перерахунку на еквівалент аскорбінової кислоти. Отримані дані свідчать про доцільність застосування цього підходу для виробництва харчових продуктів із покращеними функціональними властивостями.

Подібно до зазначених видів, міцелій *Schizophyllum commune* Fr., вирощений на восьми видах харчових злаків (сорго, кукурудза, ячмінь, пшениця, вівес, жасминовий рис, рис Mun Roо та Riceberry), також демонструє значний потенціал для підвищення функціональної цінності продуктів [31]. Найвищий вміст фенольних сполук ($8,56 \pm 1,09$ мг ЕГК/г сухої речовини) був отриманий на пшениці, а максимальна продукція флавоноїдів ($577,35 \pm 29,93$ мкг ЕГК/г сухої речовини) – на ячмені, де також зафіксовано найвищу антиоксидантну активність методом FRAP ($IC_{50} = 2,14 \pm 0,23$ мг сухої речовини/мл). Більшість зернових після 8-денного культивування демонструвала значну активність DPPH ($IC_{50} = 3,83\text{--}5,80$ мг сухої речовини/мл), тоді як найвищу ABTS-активність спостерігали у пшениці та вівсі ($IC_{50} = 2,38\text{--}3,27$ мг сухої речовини/мл). Антиоксидантні властивості корелювали з накопиченням фенольних та флавоноїдних сполук, що підкреслює потенціал міцелію *S. commune* для застосування у виробництві зернових продуктів із підвищеною біологічною цінністю та функціональними властивостями.

Зважаючи на наведені результати, слід зазначити, що даний напрям розвивався епізодично. Проте за останні роки створення ферментованих харчових продуктів міцелієм грибів стало сучасною та надзвичайно актуальною темою для стартапів, зокрема: Mycorena (www.mycorena.com; Гетеборг, Швеція, 2017), Millow (www.millow.co; Гетеборг, Швеція, 2020), Bosque Foods (раніше Kinoko Labs, www.bosquefoods.com; Нью-Йорк, США, 2020), Sincarne (www.sincarne.com; Саннівейл, США, 2021) та MycoplantEnergy (www.project4990265.tilda.ws, Жашків, Україна, 2022).

У таблиці 1 узагальнено основні переваги та можливі ризики застосування макроміцетів у ферментації харчових круп на основі сучасних наукових даних [32; 33; 34; 35; 36].

Перспективи розвитку та ключові проблеми ферментації зернових і бобових макроміцетами. У динамічно розвиненій галузі нутріціології функціональні харчові продукти сформували вагомий сегмент ринку [37] та наукових досліджень. Використання макроміцетів у ферментації зернових і бобових культур відкриває потенційний напрям розвитку харчової біотехнології, адже ферментовані продукти не лише збагачують раціон, а й стають певною ланкою на шляху профілактики захворювань та підтримання здоров'я. На відміну від традиційних методів обробки, ферментація за участю макроміцетів призводить не просто до покращення смаку чи тривалості зберігання, а до біохімічної трансформації харчових круп. Під дією ферментів грибного походження складні полімери крохмалю, білків і клітковини розщеплюються на легкодоступні сполуки, що значно підвищує їхню засвоюваність. Одночасно утворюються біоактивні метаболіти (β-глюкани, органічні кислоти, природні антиоксиданти, вітаміни групи В та інші сполуки) з терапевтичними властивостями, зокрема імуномодулювальною та протизапальною дією [38].

Інтеграція сучасних біотехнологій з omics-підходами (геноміка, транскриптоміка, протеоміка, метаболоміка) створює передумови для розробки штамів з прогнозованими властивостями та оптимізації фер-

Таблиця 1

Переваги та потенційні ризики використання макроміцетів у ферментації харчових круп

Переваги	Потенційні ризики
Підвищення харчової цінності (зростання вмісту білка, вітамінів, GABA, антиоксидантів).	Мікробна та хімічна контамінація сировини (харчових круп).
Зниження вмісту антинутрієнтів (фітатів, танінів, інгібіторів протеаз)	Утворення токсичних метаболітів. Існує ризик синтезу небажаних або потенційно токсичних сполук, які потребують контролю безпеки.
Утворення біоактивних метаболітів (полісахаридів, фенолів, ферментів з імуномодулювальними та антиоксидантними властивостями).	Органолептичні зміни. Ферментація може змінювати смак, запах, колір, що не завжди відповідає вподобанням споживачів.
Покращення зберігання (ферментовані крупки мають кращу мікробіологічну стабільність завдяки виробництву протимікробних метаболітів).	Неправильна ідентифікація. Використання невірного виду гриба через помилкову ідентифікацію, що може призвести до небажаних результатів ферментації або утворення токсичних сполук.
Енергоефективність, оскільки процеси ферментації грибами зазвичай вимагають менше енергії та ресурсів порівняно з традиційними методами виробництва харчових продуктів.	Регуляторні бар'єри – більшість макроміцетів як інгредієнти потребують відповідності нормам харчової безпеки; питання маркування, дозволів, тощо.

ментаційних процесів. Ці інструменти сприяють встановленню ключових метаболічних шляхів, керуванню синтезом корисних метаболітів і підвищенню ефективності біотрансформації сировини [9].

Незважаючи на значний потенціал, ферментація зернових і бобових із застосуванням макроміцетів стикається з низкою суттєвих викликів. Найбільш критичним є масштабування процесів від лабораторних і пілотних установок до промислових біореакторів. Це вимагає стабільності параметрів ферментації (рН, температура, аерація, вологість), збереження продуктивності та генетичної стабільності штамів, а також забезпечення незмінної якості кінцевого продукту [36]. Додаткові бар'єри можуть становити значні капітальні витрати та необхідність упровадження дороговартісних автоматизованих систем контролю й адаптацію виробничих ліній до відповідних біопроцесів.

Слід враховувати, що розвиток та успішне впровадження біопроцесів нового покоління безпосередньо залежить від інтеграції класичних ферментаційних технологій із сучасними, зокрема з системами цифрового моніторингу, інтелектуальними алгоритмами та автоматизованими системами керування. Запровадження інтеграційних механізмів зумовить суттєве підвищення ефективності, що стане чинником зростання інвестиційної привабливості біотехнологічних розробок і стимулюватиме процеси їх подальшої комерціалізації. Таким чином, збільшення інвестицій є каталізатором для розробки та масштабування інноваційних біопро-

цесів, що, своєю чергою, відкриває можливості для створення нових стартапів.

Висновки. Аналіз наукових даних підтверджує, що макроміцети мають значний біотехнологічний потенціал завдяки здатності синтезувати широкий спектр біоактивних сполук. Попри те, що застосування макроміцетів для ферментації харчових круп наразі залишається недостатньо дослідженим, цей напрям демонструє високу перспективність у створенні нових функціональних харчових продуктів, орієнтованих на покращення якості харчування, підтримання здоров'я та зниження ризику розвитку захворювань.

Серед досліджених видів найбільш вивченим і поширеним є *Pleurotus ostreatus* (глива звичайна). Наявні результати засвідчують ефективність ферментації різних видів зернових і бобових культур із залученням макроміцетів, що дозволяє суттєво підвищити їхню поживну, біологічну та функціональну цінність.

Технології, що залучають макроміцети, відкривають нові можливості для розвитку харчової промисловості та нутрицевтики, дозволяючи отримувати продукти з підвищеною поживною, біологічною та функціональною цінністю. Подальший розвиток цього напрямку пов'язаний з інтеграцією сучасних біотехнологічних рішень, автоматизованих систем керування та omics-підходів, що забезпечить можливість масштабування виробництва. Це визначає макроміцети як перспективний інструмент у формуванні інноваційних технологій харчової промисловості та нутрицевтики майбутнього.

Література:

1. Sexton A.E., Garnett T., Lorimer J. Vegan food geographies and the rise of Big Veganism. *Progress in Human Geography*. 2022. Vol. 46, № 2. P. 605–628. DOI: <https://doi.org/10.1177/03091325211051021>.
2. Rippe J.M. Lifestyle medicine: The health-promoting power of daily habits and practices. *American Journal of Lifestyle Medicine*. 2018. Vol. 12, № 6. P. 499–512. DOI: <https://doi.org/10.1177/1559827618785554>.
3. Пахуча Е.В., Севідова І.О. Тенденції розвитку міжнародного ринку функціональних продуктів. *Науково-виробничий журнал «Бізнес-навігатор»*. 2022. Вип. 1(68). С. 83–87. DOI: <https://doi.org/10.32847/business-navigator.68-26>.
4. Precedence Research. Fermented foods market size to hit USD 394.91 billion by 2034. Available at: <https://www.precedenceresearch.com/fermented-foods-market>. Accessed [21.08.2025].
5. Chai F.K., Ng R.K., Samarasiri M., Chen W.N. Precision fermentation to advance fungal food fermentations. *Current Opinion in Food Science*. 2022. Vol. 47. P. 100881. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100881>.
6. Sawant S.S., Park H.-Y., Sim E.-Y., Kim H.-S., Choi H.-S. Microbial fermentation in food: Impact on functional properties and nutritional enhancement – A review of recent developments. *Fermentation*. 2025. Vol. 11, № 1. P. 15. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation11010015>.
7. Singh N., Gaur S. Exploring the microbial niche: Recent advances in fermentation for food and beverage production V. In: Rani R., et al. (Eds.). *Innovative advancements in biotechnology* (Advances in Science, Technology & Innovation, P. 141–156). Springer. 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-80189-1_11.
8. Singh A., Kumar S. Exploring the functionality of microbes in fermented foods: Technological advancements and future directions. *Fermentation*. 2025. Vol. 11, № 6. P. 300. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation11060300>.
9. Zhang Y., Zhu X., Wang N., Liu X., Wang L., Ning K. Synergy of traditional practices and modern technology: Advancing the understanding and applications of microbial resources and processes in fermented foods. *Trends in Food Science & Technology*. 2025. Vol. 157. P. 104891. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.104891>.
10. Niego A.G., Rapior S., Thongklang N., Raspé O., Jaidee W., Lumyong S., Hyde K.D. Macrofungi as a nutraceutical source: Promising bioactive compounds and market value. *Journal of Fungi*. 2021. Vol. 7, № 5. P. 397. DOI: <https://doi.org/10.3390/jof7050397>.
11. Romero J.C.F., Oprea O.B., Gaceu L., Más Diego S.M., Morris Quevedo H.J., Galindo Alonso L., Rivero Ramírez L., Badea M. Edible mushroom cultivation in liquid medium: Impact of microparticles and advances in control systems. *Processes*. 2025. Vol. 13, № 8. P. 2452. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13082452>.

12. Chugh R.M., Mittal P., Mp N., Arora T., Bhattacharya T., Chopra H., Cavalu S., Gautam R.K. Fungal mushrooms: A natural compound with therapeutic applications. *Frontiers in Pharmacology*. 2022. Vol. 13. P. 925387. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.925387>.
13. Sun X., Shi Y., Shi D., Tu Y., Liu L. Biological activities of secondary metabolites from the edible-medicinal macrofungi. *Journal of Fungi*. 2024. Vol. 10, № 2. P. 144. DOI: <https://doi.org/10.3390/jof10020144>.
14. Krupodorova T., Barshteyn V., Ivanova T. Screening of extracellular enzymatic activity of macrofungi. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2014. Vol. 4. P. 315–318.
15. Martínez-Burgos W.J., Ocaña D., Manzoki M.C., Barros R.N., Vieira R., Soccol C.R. Edible macrofungi as an alternative protein source: Advances and trends. *Biotechnology Research and Innovation*. 2024. Vol. 8, № 1. e2024002. DOI: <https://doi.org/10.4322/biori.00022024>.
16. Dudekula U.T., Doriya K., Devarai S.K. A critical review on submerged production of mushroom and their bioactive metabolites. *3 Biotech*. 2020. Vol. 10, № 8. P. 1–12. DOI: <http://doi.org/10.1007/s13205-020-02333-y>.
17. Sangeeta, Sharma D., Ramniwas S., Mugabi R., Uddin J., Nayik G.A. Revolutionizing mushroom processing: Innovative techniques and technologies. *Food Chemistry: X*. 2024. Vol. 23. P. 101774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101774>.
18. Kim I.W., Lee H.B., Sim S.H., Yang E.I., Kim Y. Bioactive compounds and antioxidant activities of sprout soybean fermented with *Irpex lacteus* mycelia. *Food Science and Biotechnology*. 2017. Vol. 26. P. 1563–1570. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0231-y>.
19. Kim I.W., Kim Y.S. Changes in free amino acids, β -glucan, and volatile components of sprout soybeans fermented with *Irpex lacteus* mycelia. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*. 2020. Vol. 49. P. 412–418. DOI: <https://doi.org/10.3746/jkfn.2020.49.4.412>.
20. Asensio-Grau A., Calvo-Lerma J., Heredia A., Andrés A. Enhancing the nutritional profile and digestibility of lentil flour by solid-state fermentation with *Pleurotus ostreatus*. *Food Function*. 2020. Vol. 11. P. 7905–7912. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0FO01527J>.
21. Sánchez-García J., Asensio-Grau A., García-Hernández J., Heredia A., Andrés A. Nutritional and antioxidant changes in lentils and quinoa through fungal solid-state fermentation with *Pleurotus ostreatus*. *Bioresources and Bioprocessing*. 2022. Vol. 9. P. 51. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00542-2>.
22. Espinosa-Páez E., Alanis-Guzmán M.G., Hernández-Luna C.E., Báez-González J.G., Amaya-Guerra C.A., Andrés-Grau A.M. Increasing antioxidant activity and protein digestibility in *Phaseolus vulgaris* and *Avena sativa* by fermentation with the *Pleurotus ostreatus* fungus. *Molecules*. 2017. Vol. 22, № 12. P. 2275. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules22122275>.
23. Miura T., Yuan L., Sun B., Fujii H., Yoshida M., Wakame K., Kosuna K. Isoflavone aglycone produced by culture of soybean extracts with basidiomycetes and its anti-angiogenic activity. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*. 2002. Vol. 66, № 12. P. 2626–2631. DOI: <https://doi.org/10.1271/bbb.66.2626>.
24. Kohei S., Tsuyoshi T., Kazunari K.C. Soybean fermentation with basidiomycetes (medicinal mushroom mycelia). *Biology, Technology, and Agriculture*. 2020. Vol. 7. P. 23. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40538-020-00189-1>.
25. Grimrath A., Berends P., Rabe S. Koji fermentation based on extracellular peptidases of *Flammulina velutipes*. *European Food Research and Technology*. 2011. Vol. 232. P. 415–424. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-010-1437-5>.
26. Soodpakdee K., Nacha J., Rattanachart N., Owatworakit A., Chamyuang S. Fermentation with *Pleurotus ostreatus* enhances the prebiotic properties of germinated Riceberry rice. *Frontiers in Nutrition*. 2022. Vol. 9. P. 839145. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.839145>.
27. Nacha J., Soodpakdee K., Chamyuang S. Nutritional improvement of germinated Riceberry rice (*Oryza sativa*) cultivated with *Pleurotus ostreatus* mycelium. *Trends in Sciences*. 2023. Vol. 20, № 9. P. 5574. DOI: <https://doi.org/10.48048/tis.2023.5574>.
28. Benson K.F., Stamets P., Davis R., Nally R., Taylor A., Slater S., Jensen G.S. The mycelium of the *Trametes versicolor* (Turkey tail) mushroom and its fermented substrate each show potent and complementary immune activating properties in vitro. *BMC Complementary and Alternative Medicine*. 2019. Vol. 19, № 1. P. 342. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12906-019-2681-7>.
29. Darmasiwi S., Yaovapa A.R., Kimkong I. Biological activities and chemical profile of *Hericium erinaceus* mycelium cultivated on mixed red and white jasmine rice. *Food Science and Technology, Campinas*. 2022. Vol. 42. e08022. DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.08022>.
30. Postemsky P., Curvetto N. Enhancement of wheat grain antioxidant activity by solid-state fermentation with *Gri-fola* spp. *Journal of Medicinal Food*. 2014. Vol. 17, № 5. P. 543–549. DOI: <https://doi.org/10.1089/jmf.2013.0108>.
31. Boonthatui Y., Chongsuwat R., Kittisakulnam S. Production of antioxidant bioactive compounds during mycelium growth of *Schizophyllum commune* on different cereal media. *CMU Journal of Natural Sciences*. 2021. Vol. 20, № 2. e2021032. DOI: <https://doi.org/10.12982/CMUJNS.2021.032>.
32. Lu H., Lou H., Hu J., Liu Z., Chen Q. Macrofungi: A review of cultivation strategies, bioactivity, and application of mushrooms. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2020. Vol. 19, № 5. P. 2333–2356. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12602>.
33. Zhang J., Liu M., Zhao Y., Zhu Y., Bai J., Fan S., Zhu L., Song C., Xiao X. Recent developments in fermented cereals on nutritional constituents and potential health benefits. *Foods*. 2022. Vol. 11, № 15. P. 2243. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11152243>.
34. Paramithiotis S., Ray R.C. Recent concerns about fermented food safety. In: Martin J.G.P., De Dea Lindner J., Melo Pereira G.V.d., Ray R.C. (Eds.). *Trending topics on fermented foods*. Springer, Cham. 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-72000-0_15.

35. Kiteša D.A. Review on effect of fermentation on physicochemical properties, anti-nutritional factors and sensory properties of cereal-based fermented foods and beverages. *Annals of Microbiology*. 2024. Vol. 74. P. 32. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13213-024-01763-w>.
36. Sangeeta, Sharma D., Ramniwas S., Mugabi R., Uddin J., Nayik G.A. Revolutionizing mushroom processing: Innovative techniques and technologies. *Food Chemistry: X*. 2024. Vol. 23. P. 101774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101774>.
37. Rashidinejad A. The road ahead for functional foods: Promising opportunities amidst industry challenges. *Future Postharvest and Food*. 2024. Vol. 1, № 2. P. 266–273. DOI: <https://doi.org/10.1002/fpf2.12022>.
38. Martínez-Burgos W.J., Montes Montes E., Pozzan R., Serra J.L., Torres D.O., Manzoki M.C., Vieira R.L., dos Reis G.A., Rodrigues C., Karp S.G., Soccol C. R. Bioactive compounds produced by macromycetes for application in the pharmaceutical sector: Patents and products. *Fermentation*. 2024. Vol. 10, № 6. P. 275. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation10060275>.

References:

- Sexton, A. E., Garnett, T., & Lorimer, J. (2022). Vegan food geographies and the rise of Big Veganism. *Progress in Human Geography*, 46(2), 605–628. <https://doi.org/10.1177/030913252111051021>
- Rippe, J. M. (2018). Lifestyle medicine: The health-promoting power of daily habits and practices. *American Journal of Lifestyle Medicine*, 12(6), 499–512. <https://doi.org/10.1177/1559827618785554>
- Pakhucha, E. V., & Sievidova, I. O. (2022). Tendentsii rozvytku mizhnarodnoho rynku funktsional'nykh produktiv [Trends in the development of the international market for functional products]. *Biznes-navihator*, 1(68), 83–87 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32847/business-navigator.68-26>
- Precedence Research. (n.d.). *Fermented foods market size to hit USD 394.91 billion by 2034*. <https://www.precedenceresearch.com/fermented-foods-market>
- Chai, F. K., Ng, R. K., Samarasiri, M., & Chen, W. N. (2022). Precision fermentation to advance fungal food fermentations. *Current Opinion in Food Science*, 47, 100881. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100881>
- Sawant, S. S., Park, H.-Y., Sim, E.-Y., Kim, H.-S., & Choi, H.-S. (2025). Microbial fermentation in food: Impact on functional properties and nutritional enhancement – A review of recent developments. *Fermentation*, 11(1), 15. <https://doi.org/10.3390/fermentation11010015>
- Singh, N., & Gaur, S. (2024). Exploring the microbial niche: Recent advances in fermentation for food and beverage production V. In R. Rani, et al. (Eds.), *Innovative advancements in biotechnology* (Advances in Science, Technology & Innovation, pp. 141–156). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80189-1_11
- Singh, A., & Kumar, S. (2025). Exploring the functionality of microbes in fermented foods: Technological advancements and future directions. *Fermentation*, 11(6), 300. <https://doi.org/10.3390/fermentation11060300>
- Zhang, Y., Zhu, X., Wang, N., Liu, X., Wang, L., & Ning, K. (2025). Synergy of traditional practices and modern technology: Advancing the understanding and applications of microbial resources and processes in fermented foods. *Trends in Food Science & Technology*, 157, 104891. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.104891>
- Niego, A. G., Rapior, S., Thongklang, N., Raspé, O., Jaidee, W., Lumyong, S., & Hyde, K. D. (2021). Macrofungi as a nutraceutical source: Promising bioactive compounds and market value. *Journal of Fungi*, 7(5), 397. <https://doi.org/10.3390/jof7050397>
- Romero, J. C. F., Oprea, O. B., Gaceu, L., Más Diego, S. M., Morris Quevedo, H. J., Galindo Alonso, L., Rivero Ramírez, L., & Badae, M. (2025). Edible mushroom cultivation in liquid medium: Impact of microparticles and advances in control systems. *Processes*, 13(8), 2452. <https://doi.org/10.3390/pr13082452>
- Chugh, R. M., Mittal, P., Mp, N., Arora, T., Bhattacharya, T., Chopra, H., Cavalu, S., & Gautam, R. K. (2022). Fungal mushrooms: A natural compound with therapeutic applications. *Frontiers in Pharmacology*, 13, 925387. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.925387>
- Sun, X., Shi, Y., Shi, D., Tu, Y., & Liu, L. (2024). Biological activities of secondary metabolites from the edible-medicinal macrofungi. *Journal of Fungi*, 10(2), 144. <https://doi.org/10.3390/jof10020144>
- Krupodorova, T., Barshteyn, V., & Ivanova, T. (2014). Screening of extracellular enzymatic activity of macrofungi. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 4, 315–318.
- Martínez-Burgos, W. J., Ocaña, D., Manzoki, M. C., Barros, R. N., Vieira, R., & Soccol, C. R. (2024). Edible macromycetes as an alternative protein source: Advances and trends. *Biotechnology Research and Innovation*, 8(1), e2024002. <https://doi.org/10.4322/biori.00022024>
- Dudekula, U. T., Doriya, K., & Devarai, S. K. (2020). A critical review on submerged production of mushroom and their bioactive metabolites. *3 Biotech*, 10(8), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02333-y>
- Sangeeta, Sharma, D., Ramniwas, S., Mugabi, R., Uddin, J., & Nayik, G. A. (2024). Revolutionizing mushroom processing: Innovative techniques and technologies. *Food Chemistry: X*, 23, 101774. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101774>
- Kim, I. W., Lee, H. B., Sim, S. H., Yang, E. I., & Kim, Y. (2017). Bioactive compounds and antioxidant activities of sprout soybean fermented with *Irpex lacteus* mycelia. *Food Science and Biotechnology*, 26, 1563–1570. <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0231-y>
- Kim, I. W., & Kim, Y. S. (2020). Changes in free amino acids, β -glucan, and volatile components of sprout soybeans fermented with *Irpex lacteus* mycelia. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 49, 412–418. <https://doi.org/10.3746/jkfn.2020.49.4.412>

20. Asensio-Grau, A., Calvo-Lerma, J., Heredia, A., & Andrés, A. (2020). Enhancing the nutritional profile and digestibility of lentil flour by solid-state fermentation with *Pleurotus ostreatus*. *Food Function*, *11*, 7905–7912. <https://doi.org/10.1039/D0FO01527J>
21. Sánchez-García, J., Asensio-Grau, A., García-Hernández, J., Heredia, A., & Andrés, A. (2022). Nutritional and antioxidant changes in lentils and quinoa through fungal solid-state fermentation with *Pleurotus ostreatus*. *Bioresources and Bioprocessing*, *9*, 51. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00542-2>
22. Espinosa-Páez, E., Alanís-Guzmán, M. G., Hernández-Luna, C. E., Báez-González, J. G., Amaya-Guerra, C. A., & Andrés-Grau, A. M. (2017). Increasing antioxidant activity and protein digestibility in *Phaseolus vulgaris* and *Avena sativa* by fermentation with the *Pleurotus ostreatus* fungus. *Molecules*, *22*(12), 2275. <https://doi.org/10.3390/molecules22122275>
23. Miura, T., Yuan, L., Sun, B., Fujii, H., Yoshida, M., Wakame, K., & Kosuna, K. (2002). Isoflavone aglycone produced by culture of soybean extracts with basidiomycetes and its anti-angiogenic activity. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, *66*(12), 2626–2631. <https://doi.org/10.1271/bbb.66.2626>
24. Kohei, S., Tsuyoshi, T., & Kazunari, K. C. (2020). Soybean fermentation with basidiomycetes (medicinal mushroom mycelia). *Biology, Technology, and Agriculture*, *7*, 23. <https://doi.org/10.1186/s40538-020-00189-1>
25. Grimrath, A., Berends, P., & Rabe, S. (2011). Koji fermentation based on extracellular peptidases of *Flammulina velutipes*. *European Food Research and Technology*, *232*, 415–424. <https://doi.org/10.1007/s00217-010-1437-5>
26. Soodpakdee, K., Nacha, J., Rattanachart, N., Owatworakit, A., & Chamyuang, S. (2022). Fermentation with *Pleurotus ostreatus* enhances the prebiotic properties of germinated Riceberry rice. *Frontiers in Nutrition*, *9*, 839145. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.839145>
27. Nacha, J., Soodpakdee, K., & Chamyuang, S. (2023). Nutritional improvement of germinated Riceberry rice (*Oryza sativa*) cultivated with *Pleurotus ostreatus* mycelium. *Trends in Sciences*, *20*(9), 5574. <https://doi.org/10.48048/tis.2023.5574>
28. Benson, K. F., Stamets, P., Davis, R., Nally, R., Taylor, A., Slater, S., & Jensen, G. S. (2019). The mycelium of the *Trametes versicolor* (Turkey tail) mushroom and its fermented substrate each show potent and complementary immune activating properties in vitro. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, *19*(1), 342. <https://doi.org/10.1186/s12906-019-2681-7>
29. Darmasiwi, S., Yaovapa, A. R., & Kimkong, I. (2022). Biological activities and chemical profile of *Herichium erinaceus* mycelium cultivated on mixed red and white jasmine rice. *Food Science and Technology, Campinas*, *42*, e08022. <https://doi.org/10.1590/fst.08022>
30. Postemsky, P., & Curvette, N. (2014). Enhancement of wheat grain antioxidant activity by solid-state fermentation with *Grifola* spp. *Journal of Medicinal Food*, *17*(5), 543–549. <https://doi.org/10.1089/jmf.2013.0108>
31. Boonthatui, Y., Chongsuwat, R., & Kittisakulnam, S. (2021). Production of antioxidant bioactive compounds during mycelium growth of *Schizophyllum commune* on different cereal media. *CMU Journal of Natural Sciences*, *20*(2), e2021032. <https://doi.org/10.12982/CMUJNS.2021.032>
32. Lu, H., Lou, H., Hu, J., Liu, Z., & Chen, Q. (2020). Macrofungi: A review of cultivation strategies, bioactivity, and application of mushrooms. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *19*(5), 2333–2356. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12602>
33. Zhang, J., Liu, M., Zhao, Y., Zhu, Y., Bai, J., Fan, S., Zhu, L., Song, C., & Xiao, X. (2022). Recent developments in fermented cereals on nutritional constituents and potential health benefits. *Foods*, *11*(15), 2243. <https://doi.org/10.3390/foods11152243>
34. Paramithiotis, S., & Ray, R. C. (2024). Recent concerns about fermented food safety. In J. G. P. Martin, J. De Dea Lindner, G. V. d. Melo Pereira, & R. C. Ray (Eds.), *Trending topics on fermented foods*. Springer, Cham. pp. 387-413. https://doi.org/10.1007/978-3-031-72000-0_15
35. Kiteessa, D. A. (2024). Review on effect of fermentation on physicochemical properties, anti-nutritional factors and sensory properties of cereal-based fermented foods and beverages. *Annals of Microbiology*, *74*, 32. <https://doi.org/10.1186/s13213-024-01763-w>
36. Sangeeta, Sharma, D., Ramniwas, S., Mugabi, R., Uddin, J., & Nayik, G. A. (2024). Revolutionizing mushroom processing: Innovative techniques and technologies. *Food Chemistry: X*, *23*, 101774. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101774>
37. Rashidinejad, A. (2024). The road ahead for functional foods: Promising opportunities amidst industry challenges. *Future Postharvest and Food*, *1*(2), 266–273. <https://doi.org/10.1002/fpf2.12022>
38. Martínez-Burgos, W. J., Montes Montes, E., Pozzan, R., Serra, J. L., Torres, D. O., Manzoki, M. C., Vieira, R. L., dos Reis, G. A., Rodrigues, C., Karp, S. G., & Soccol, C. R. (2024). Bioactive compounds produced by macromycetes for application in the pharmaceutical sector: Patents and products. *Fermentation*, *10*(6), 275. <https://doi.org/10.3390/fermentation10060275>

Дата першого надходження рукопису до видання: 19.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 22.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025

ВПЛИВ ГЕРБІЦИДУ РАУНДАП НА АЗОТОФІКСУВАЛЬНІ БАКТЕРІЇ РОДУ *AZOTOBACTER*

Звір Галина Іванівна,

кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри мікробіології

Львівського національного університету імені Івана Франка

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9047-4418>

Scopus Author ID: 57217245960

Web of Science Researcher ID: L-4077-2017

Різун Ганна Михайлівна,

асистент кафедри лабораторної медицини

КЗВО ЛОР «Львівська медична академія імені Андрія Крупинського»

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3059-3789>

У статті наведено результати дослідження впливу гербіциду Раундап на нагромадження біомаси та утворення йонів амонію клітинами азотофіксувальних бактерій *Azotobacter chroococcum* VKM B-1272 та *Azotobacter* sp. A2. Чутливість бактерій до дії гербіциду досліджували диско-дифузійним методом, використовуючи паперові диски, просочені різними концентраціями препарату. З метою дослідження впливу Раундапу на нагромадження біомаси азотофіксувальні бактерії вирощували в середовищі Ешбі упродовж 2–3 діб за температури 28 °C та аеробних умов. Гербіцид додавали в концентраціях 8 мл/л (рекомендована доза) та 16 мл/л. Біомасу та концентрацію йонів амонію вимірювали фотоелектроколориметричним методом за довжини хвилі 390 нм та 640 нм відповідно. Встановлено, що Раундап за рекомендованої до використання та вдвічі вищої дози інгібував ріст та утворення йонів амонію мікроорганізмами-діазотрофами за лабораторних умов. Внесення у середовище культивування бактерій Раундапу спричинило зниження нагромадження біомаси обома штамами азотофіксувальних бактерій у логарифмічній фазі росту. Зниження біомаси, можливо, відбувається внаслідок присутності в гербіциді, крім діючої речовини, інертних компонентів, консервантів тощо, призначених для підвищення ефективності препарату, стабільності, подовження терміну зберігання тощо. Попереднє культивування азотофіксувальних бактерій у середовищі з Раундапом у рекомендованій дозі робить їх чутливими до дії гербіциду і зумовлює зниження мікробної біомаси порівняно з вихідними культурами. Відновлення атмосферного азоту до аміаку вільноживучими азотофіксувальними бактеріями роду *Azotobacter* пригнічувалося гербіцидом залежно від його концентрації у середовищі та сенситивізації мікроорганізмів. Продемонстровано, що неодноразове застосування Раундапу сенситивізує мікроорганізми до дії гербіциду, що зрештою негативно позначається не лише на нагромадженні біомаси, але й на процесі діазотрофії. Наголошено на важливості дозованого та обґрунтованого застосування гербіцидів на основі гліфосату задля уникнення негативного впливу на мікроорганізми ґрунту, що беруть участь у кругообігу нітрогену.

Ключові слова: гербіциди, гліфосат, Раундап, азотофіксувальні мікроорганізми, *Azotobacter*, діазотрофія.

Zvir Galyna, Rizun Hanna. Effect of the herbicide Roundup on nitrogen-fixing bacteria of the genus *Azotobacter*

The article presents the results of a study on the effect of the herbicide Roundup on biomass accumulation and ammonium ion formation by nitrogen-fixing bacteria *Azotobacter chroococcum* VKM B-1272 and *Azotobacter* sp. A2. The sensitivity of the bacteria to the herbicide was assessed by the disc diffusion method using paper discs impregnated with different concentrations of the preparation. To investigate the effect of Roundup on biomass accumulation, nitrogen-fixing bacteria were cultivated in Ashby medium for 2–3 days at 28 °C under aerobic conditions. The herbicide was added at concentrations of 8 mL/L (recommended dose) and 16 mL/L. Biomass and ammonium ion concentrations were measured using a photoelectric colorimeter at wavelengths of 390 nm and 640 nm, respectively. The results showed that Roundup, at both the recommended and double doses, inhibited the growth and ammonium ion production by diazotrophic microorganisms under laboratory conditions. The addition of Roundup to the cultivation medium reduced biomass accumulation by both strains of nitrogen-fixing bacteria during the logarithmic growth phase. This reduction may be attributed not only to the active ingredient, but also to the presence of inert components, preservatives, and other additives in the herbicide formulation, designed to enhance efficacy, stability, and shelf life. Preliminary cultivation of nitrogen-fixing bacteria in medium containing Roundup at the recommended dose increased their sensitivity to the herbicide, resulting in lower microbial biomass compared with the original cultures. The reduction of atmospheric nitrogen to ammonia by free-living nitrogen-fixing bacteria of the genus *Azotobacter* was inhibited by the herbicide depending on its concentration in the medium and the sensitisation of microorganisms. The findings demonstrated that repeated application of Roundup sensitizes microorganisms to its action, ultimately exerting a negative impact not only on biomass accumulation but also on the process of diazotrophy. These results emphasize the importance of the rational and controlled use of glyphosate-based herbicides to minimize adverse effects on soil microorganisms involved in the nitrogen cycle.

Key words: herbicides, glyphosate, Roundup, nitrogen-fixing microorganisms, *Azotobacter*, diazotrophy.

Вступ. Пестициди є ефективним та економічним способом підвищення якості та кількості врожаю. Вони забезпечують продовольчу безпеку країн в умовах постійно зростаючої кількості населення на нашій планеті. За оцінками фахівців, третину сільськогосподарської продукції у світі отримують завдяки застосуванню засобів захисту рослин. Їх використовують для різних видів культур з метою знищення, відлякування та контролю чисельності шкідників (гризунів, комах), зниження забур'яненості полів. Без застосування пестицидів втрати плодів, овочів та зернових від шкідників, фітопатогенів і бур'янів сягали б від 30 % до 100 % [1]. У квітникарстві та ландшафтному дизайні пестициди використовують з метою контролю чисельності шкідливих комах, що пошкоджують квіти й листя, знищення кліщів, які становлять загрозу для рослин, особливо в умовах теплиць, а також для профілактики та лікування грибкових захворювань, таких як фітофтороз, борошниста роса, сіра й коренева гниль, парша тощо. Гербициди застосовують також для знищення небажаної рослинності на узбіччях, тротуарах та інших територіях несільськогосподарського призначення.

Кожна країна самостійно визначає перелік препаратів, дозволених до застосування, а також список хімічних речовин, заборонених для використання на сільськогосподарських угіддях. Державну реєстрацію пестицидів і агрохімікатів здійснює Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, що реалізує державну політику у сфері охорони навколишнього природного середовища, в порядку та розмірах, встановлених Кабінетом Міністрів України, на підставі позитивних результатів випробувань та матеріалів досліджень. Перелік пестицидів та агрохімікатів, дозволених до використання в Україні, побудований на основі інтерактивної версії державного реєстру пестицидів та агрохімікатів [2]. Його оновлюють автоматично залежно від поточної дати на основі даних про реєстрацію препаратів. Станом на червень 2024 року, у цьому переліку понад 1000 гербицидів, обсяги застосування яких продовжують зростати в Україні, незважаючи на війну. За даними керівника агрохімічного напрямку та бренду DEFENDA LNZ Group Сергія Борисова, за перше півріччя 2024 року обсяги продажу гербицидів зросли практично в усіх виробників. Цьому сприяли такі чинники, як ціна, котра порівняно з 2023 роком стала доступнішою для аграріїв, а також необхідність обробок, без яких неможливе отримання запланованого врожаю [3].

Застосування гербицидів у сільському господарстві зумовлене насамперед високою забур'яненістю посівів. Використання поживних речовин бур'янами за відсутності заходів боротьби з ними значно перевищує можливість засвоєння їх культурними рослинами. На площах із високою забур'яненістю погіршується якість проведення передпосівного обробітку, сівби та догляду за посівами під час вегетації, що призупиняє ріст і розвиток рослин, погіршує умови формування репродуктивних органів, унаслідок чого відбувається зниження урожайності та якості продукції [4, 5].

У переліку дозволених до використання в Україні гербицидів приблизно 10 % – препарати, діючою речовиною яких є гліфосат (N-фосфонометильне похідне амінокислоти гліцину (*Глі-Фос-ат*) (рис. 1).

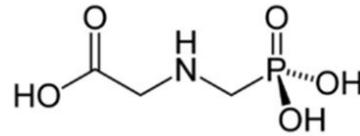


Рис. 1. Структурна формула гліфосату ($C_3H_8NO_5P$) [6]

З хімічного погляду гліфосат – слабка органічна кислота. У препаратах гліфосат ($C_3H_8NO_5P$) представлений у вигляді солей – калієвої, етаноламінної, диметиламінної, амонійної чи ізопропіламінної), завдяки чому він набуває високої розчинності у воді і стає хімічно стабільним [6].

Гліфосат – неспецифічний фосфорорганічний пестицид, який широко застосовують в сільському господарстві проти багаторічних та однорічних бур'янів, а також у лісівництві, присадибних господарствах та міських районах. Він є важливим компонентом неселективних та післясходових гербицидів, які використовують для захисту сільськогосподарських культур від трав, однорічних широколистяних бур'янів, деревної рослинності тощо [4]. Гліфосат – єдиний гербицид, який діє на 5-енолпірувілшикімат-3-фосфатсинтазу (5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase (EPSP synthase, EPSPS)). Цей фермент каталізує синтез хоризмату – рослинного попередника трьох ароматичних амінокислот (феніланіну, тирозину, триптофану), а також низки інших важливих для рослини сполук, зокрема саліцилової кислоти та деяких алкалоїдів [7]. Інгібування ферменту EPSPS гліфосатом призводить до зниження інтенсивності біосинтезу вторинних метаболітів та структурних білків, що обумовлює порушення білкового обміну в клітинах рослин. Унаслідок цього відбувається пригнічення утворення хлорофілу, що зумовлює порушення фотосинтезу і подальшу загибель рослин. Фітотоксична дія гербициду проявляється в поступовому в'яненні оброблених бур'янів, побурінні надземних органів і відмиранні підземної частини рослини.

Солі гліфосату використовують також як десиканти з метою прискорення досягання культури і полегшення збирання врожаю, оскільки вони чинять системну дію на рослину – як на надземну, так і на кореневу частину, пришвидшуючи природний процес дозрівання зерна [8, 9]. Тому гербициди на основі гліфосату є найпоширенішими пестицидами у світі. Комерційні продукти, що містять гліфосат, різняться за складом і продаються під численними торговими назвами у більш ніж 130 країнах світу [10]. Найпопулярнішими в Україні є Раундап, Ураган, Гліфовіт, Торнадо, Отаман, Напалм. Ці препарати зазвичай містять добавки, інертні інгредієнти та поверхнево-активні речовини (ПАР). Наприклад, крім основної діючої речовини, до складу Раундапу

входять сорбінова кислота, натрій сульфат, амоній сульфат, калій гідроксид, метилпіролідон, ізобутан, 3-йодо-2-пропінілбутилкарбамат [11].

Гліфосат вважають безпечнішим за інші гербіциди, проте його надмірне використання має хронічний вплив на навколишнє середовище. Його висока розчинність у гідрофільних розчинниках, особливо у воді, та висока мобільність призводять до вимивання гліфосату в ґрунт, що спричинює забруднення ґрунтових вод та накопичення його в тканинах рослин. Наслідком є зниження врожайності, низька якість сільськогосподарської продукції, погіршення родючості ґрунту, забруднення води та виникнення загрози життю людини та тварин [4].

Деградація гліфосату у воді, водних осадах та ґрунті обумовлена головню його руйнуванням мікроорганізмами [7, 12]. Основний шлях деградації гліфосату полягає в розщепленні С-N-зв'язку з утворенням первинного метаболіту – амінометилфосфонової кислоти (АМФК), яка згодом розкладається мікроорганізмами до вуглекислого газу та інших простих неорганічних сполук. АМФК, яку часто виявляють в осадових, поверхневих та ґрунтових водах, спричинює вторинне забруднення навколишнього середовища [13].

Гліфосат може змінювати структуру та біологічні властивості ґрунту, впливати на мікробне різноманіття, однак його вплив на ґрунтовий мікробіом залишається суперечливим. Інгібування EPSPS гліфосатом порушує синтез основних вторинних метаболітів і білків у рослин, в також пригнічує ключові енергетичні метаболічні шляхи у клітинах ґрунтових мікроорганізмів [7]. Багаторічні дослідження впливу гліфосату на полях канадських прерій у сівозміні пшениця – польовий горох – канола – пшениця не виявили суттєвих змін мікробних властивостей ґрунту [14]. Vázquez et al. продемонстрували тимчасовий стимулювальний ефект на нагромадження біомаси ґрунтових грибів та негативний вплив гліфосату на їхнє видове різноманіття на сільськогосподарських угіддях у разі внесення в ґрунт подвійних доз гербіциду або тривалого (повторного) застосування гліфосату [15]. Застосування подвійних доз гліфосату спричинює зниження чисельності актинобактерій ґрунту та зростання кількості суббактерій та мікроміцетів, ріст та розмноження яких залежать від продукованих актинобактеріями антибіотиків [16]. Інертні компоненти, добавки, ПАР препаратів на основі гліфосату можуть компенсувати токсичний вплив діючої речовини, стимулюючи ріст мікроорганізмів та прискорюючи деградацію гліфосату [11, 17]. Препарати гліфосату можуть пригнічувати ключові енергетичні метаболічні шляхи у клітинах ґрунтових мікроорганізмів, у тому числі роботу нітрогеназного комплексу азотофіксувальних мікроорганізмів, завдяки яким відбувається фіксування атмосферного нітрогену.

Мета дослідження – дослідити вплив гербіциду Раундап на нагромадження біомаси та утворення іонів амонію клітинами азотофіксувальних бактерій роду *Azotobacter* за лабораторних умов.

Матеріал та методи. Об'єктом дослідження були азотофіксувальні бактерії *Azotobacter chroococcum* ВКМ

В-1272, які зберігаються в колекції культур мікроорганізмів кафедри мікробіології Львівського національного університету імені Івана Франка, а також штама *Azotobacter* sp. А2, виділений із ґрунту, забрудненого пестицидами. Бактерії виділяли з ґрунту, відібраного з верхнього шару (0–15 см) поблизу складу пестицидів та мінеральних добрив на території Пустомитівського району Львівської області, висіваючи зразки на середовище Ешбі [18]. Колонії мікроорганізмів, які вирости на середовищі Ешбі, пересівали на щільне елективне середовище для *Azotobacter chroococcum* такого складу (г/л): глюкоза – 20,0; K_2HPO_4 – 0,8; $CaCO_3$ – 20,0; $FeCl_3 \times 6H_2O$ – 0,1; $Na_2MoO_4 \times 2H_2O$ – 0,005; агар – 20,0; вода дистильована – 1 л. Після отримання чистих культур проводили морфологічну ідентифікацію та досліджували біохімічні властивості бактерій з метою підтвердження їхньої приналежності до роду *Azotobacter*.

На елективному для *A. chroococcum* середовищі бактерії росли у вигляді слизистих, круглих, матових колоній діаметром 5–10 мм, білого чи молочного кольору, з випуклим профілем, маслянистою чи пастоподібною консистенцією. Бактерії Грам-негативні, аеробні, неспортовіріні, овальної чи кулястої форми, розміром 1,5–2 мкм, оточені капсулою, рухливі. Клітини розташовані поодиночці чи парами (рис. 2). Оптимальна температура росту +25...+30 °С. Як джерело карбону використовують глюкозу, сахарозу, маніт, гліцерин. Бактерії каталазо- та оксидазопозитивні. Загалом виділено 5 штамів, один з яких (*Azotobacter* sp. А2) використано для подальших досліджень.



Рис. 2. Азотофіксувальні бактерії, виділені з ґрунту на елективному для *Azotobacter chroococcum* середовищі (світлова мікроскопія, $\times 1000$)

З метою визначення чутливості бактерій роду *Azotobacter* до дії Раундапу використовували метод дифузії в агаризоване середовище з використанням паперових дисків, які насичували різними концентраціями гербіциду. Розплавлене живильне середовище (м'ясо-пептонний агар, МПА) розливали в стерильні чашки Петрі, наносили дві-три краплі суспензії бактерій, які розтирали стерильним шпателем по поверхні середовища (посів газоном). Диски, насичені різними концентраціями гербіциду (8 мл/л – рекомендована

виробником доза; подвійна доза – 16 мл/л; половинна доза – 4 мл/л), поміщали на чашку з МПА за допомогою профламованого пінцета. Чашки культивували в термостаті за температури 28 °С упродовж 48 год. За діаметром зони затримки росту досліджуваних культур навколо дисків оцінювали їхню чутливість до Раундапу. У роботі використовували препарат фірми Монсанто, який містить 360 г/л гліфосату.

З метою дослідження впливу Раундапу на ріст бактерій *A. chroococcum* ВКМ В-1272 та *Azotobacter* sp. А2 культури вирощували в пробірках об'ємом 20 мл у середовищі Ешбі (густина засіву – 0,05 г/л) упродовж 2–3 діб за температури 28 °С та аеробних умов, вносячи Раундап у концентраціях 8 та 16 мл/л середовища. Контролем було середовище Ешбі без гербіциду. Біомасу вимірювали за мутністю розведеної суспензії клітин фотометричним методом з використанням фотоелектроколориметра КФК-3 ($\lambda = 390$ нм) у кюветі з оптичним шляхом 3 мм і розраховували за формулою: C (г/л) = $E_{390} \times n / K$, де E_{390} – екстинкція за довжини хвилі 390 нм; n – розведення, разів; K – коефіцієнт перерахунку, отриманий за калібрувальною кривою залежності екстинкції від сухої маси клітин (для *A. chroococcum* ВКМ В-1272 $K = 0,77 \pm 0,08$, для *Azotobacter* sp. А2 $K = 0,79 \pm 0,09$). Концентрацію йонів амонію вимірювали фотоелектроколориметричним методом ($\lambda = 640$ нм) [18].

Усі дослідження виконували у трьох повторях. Статистичну обробку результатів проводили за допомогою програм Microsoft Excel 2003, Origin Pro 7,0. Вираховували основні статистичні показники за безпосередніми даними (середнє арифметичне – M ; стандартна похибка середнього арифметичного – m).

Результати дослідження. Нітроген є життєво важливою сполукою для росту та розвитку живих організмів, проте через його інертний потрійний зв'язок атмосферний азот не може безпосередньо засвоюватися рослинами. Приблизно 80% N_2 перетворюється у форми, придатні для засвоєння рослинами (солі амонію та нітрати), завдяки біологічній фіксації азоту азо-

тофіксувальними мікроорганізмами, що належать до різних таксономічних груп [19]. Застосування засобів захисту рослин (гербіцидів, фунгіцидів, інсектицидів) може впливати на різноманітність та активність мікробних угруповань і на кругообіг нітрогену в природі загалом. Тому важливо суворо дотримуватися рекомендацій виробника щодо дозування цих препаратів.

Застосування диско-дифузійного методу показало, що гербіцид Раундап у рекомендованій концентрації (8 мл/л) не впливав на ріст музейної культури азотофіксувальних бактерій. За вдвічі вищої концентрації унаслідок дифузії в агар Раундапу спостерігали незначне інгібування росту бактерій *A. chroococcum* ВКМ В-1272, про що свідчить утворення стерильних зон навколо індикаторних дисків, діаметр яких становив 8–11 мм (рис. 3).

Бактерії *Azotobacter* sp. А2, виділені із забрудненого пестицидами ґрунту, були більш чутливими до дії досліджуваного гербіциду. За рекомендованої до використання дози гербіцид унаслідок дифузії в агар інгібував ріст бактерій – діаметр зони затримки росту становив 12–15 мм. Збільшення концентрації гербіциду вдвічі (16 мл/л) зумовлювало збільшення діаметру стерильної зони до 17–18 мм (рис. 4). М'ясо-пептонний агар є багатим живильним середовищем, яке містить джерела карбону, нітрогену, вітамінів, амінокислот, тому поява стерильних зон навколо дисків демонструє пряму токсичність і локальний ефект гербіциду відповідно до його концентрації.

Мікробний ценоз ґрунту першим контактує з чужорідними для довкілля речовинами (ксенобіотиками). Адаптуючись до нових умов існування, мікроорганізми формують стійкість до них або змінюють свої фізіологічні властивості, що може позначитись на родючості ґрунту загалом. Особливо чутливою до дії токсичних сполук є логарифмічна фаза росту, в якій клітини активно діляться, синтезують білки, нуклеїнові кислоти, компоненти клітинної стінки. У випадку азотофіксувальних бактерій навіть невеликі дози ксенобіотиків можуть спричинити значне уповільнення росту й зни-

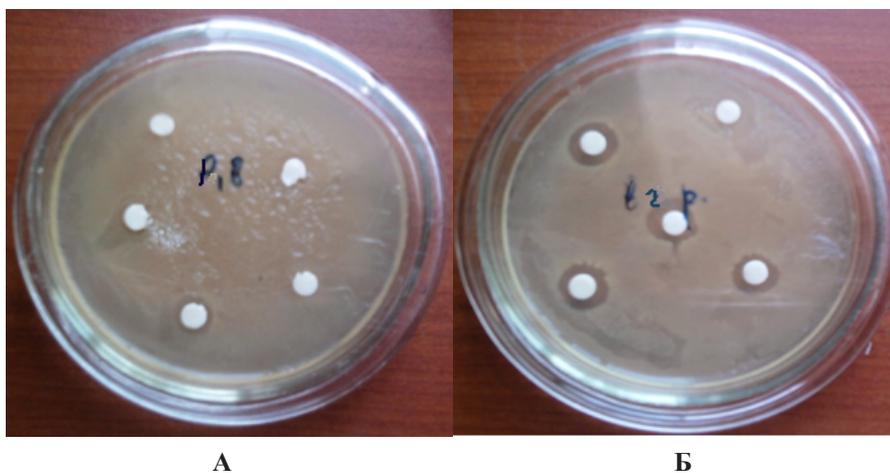


Рис. 3. Чутливість бактерій *Azotobacter chroococcum* ВКМ В-1272 до дії гербіциду Раундап (А – 8 мл/л; Б – 16 мл/л)

ження показників біомаси. Внесення Раундапу у середовище Ешбі призвело до зниження нагромадження біомаси обома штамми азотофіксувальних бактерій у логарифмічній фазі росту (рис. 5).

Упродовж першої доби культивування значення біомаси в контролі було більшим у 1,4 разу для *A. chroococcum* ВКМ В-1272 та в 1,1 разу для *Azotobacter* sp. А2 порівняно з відповідним показником за впливу гербіциду у рекомендованій дозі. За внесення у середовище Ешбі подвійної концентрації Раундапу спостерігали зниження біомаси азотофіксувальних бактерій у 4,2 разу для *A. chroococcum* ВКМ В-1272 та у 2,5 разу

для *Azotobacter* sp. А2 стосовно контролю. На другу добу росту на фоні зростання біомаси у середовищі без гербіциду виявлено пригнічення росту обох штамів азотофіксувальних бактерій за дії рекомендованої та вдвічі вищої дози Раундапу. Зниження біомаси, можливо, відбувається внаслідок присутності в гербіциді крім гліфосату (який бактерії можуть використовувати як джерело карбону, нітрогену, фосфору) інертних компонентів, ПАР тощо, призначених для підвищення ефективності препарату, стабільності, подовження терміну зберігання тощо. До складу Раундапу входять ізобутан, метилпіролідон, сорбінова кислота, натрій сульфат, амоній суль-

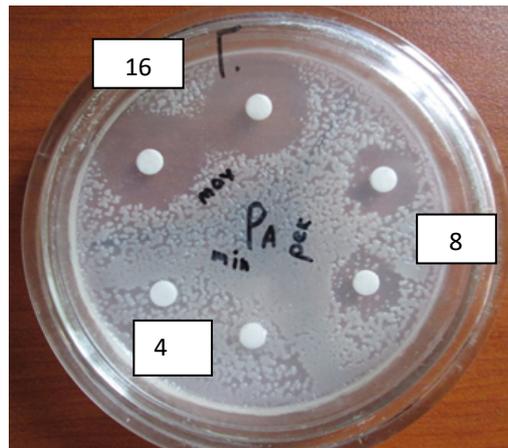


Рис. 4. Чутливість *Azotobacter* sp. А2 до дії гербіциду Раундап за різних концентрацій

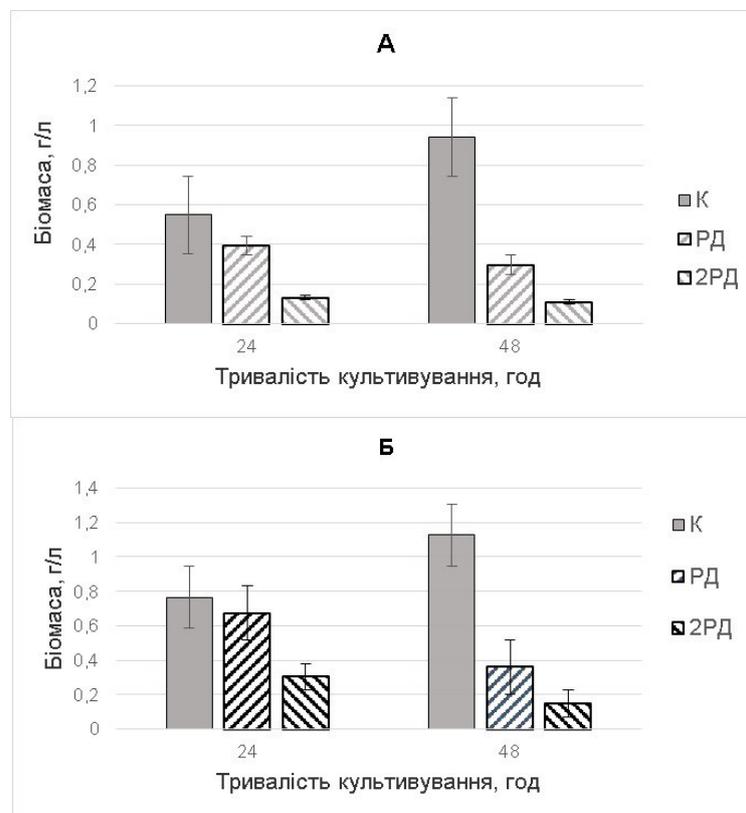


Рис. 5. Нагромадження біомаси азотофіксувальними бактеріями *Azotobacter chroococcum* ВКМ В-1272 (А) та *Azotobacter* sp. А2 (Б) за впливу Раундапу (К – контроль; РД – рекомендована доза; 2РД – подвійна доза)

фат, калій гідроксид, 3-йодо-2-пропінілбутилкарбамат, що, можливо, робить препарат токсичнішим порівняно з його діючою речовиною – гліфосатом. Суттєве зниження біомаси бактерій виявлено у разі збільшення концентрації гербіциду в 2 рази, тобто у разі перевищення рекомендованої дози (у 8,7 разу для *A. chroococcum* ВКМ В-1272 та в 7,6 разу для *Azotobacter* sp. А2).

У сільськогосподарській практиці одноразове внесення гербіциду не забезпечує повного знищення бур'янів, тому з метою контролю забур'яненості посівних площ та підвищення врожайності застосовують повторні обробки ділянок (проти так званої другої хвилі сходів). Враховуючи здатність гліфосату акумулюватися в ґрунті та його тривалий період напіврозпаду (від 20 до 100 днів), ми дослідили нагромадження біомаси азотофіксувальними бактеріями, попередньо вирощеними у середовищі з Раундапом у рекомендованій дозі, за впливу гербіциду (рис. 5).

Попереднє культивування азотофіксувальних бактерій у середовищі з Раундапом робить їх чутливими (сенсibiliзованими) до гербіциду і зумовлює зниження мікробної біомаси у середовищі Ешбі порівняно з вихідними культурами. Вирощені у середовищі з Раундапом за концентрації 8 мл/л бактерії *A. chroococcum* ВКМ В-1272 накопичували упродовж першої доби в 1,8 разу менше біомаси порівняно з музей-

ною культурою. У випадку бактерій *Azotobacter* sp. А2, попередньо вирощених у середовищі з гербіцидом, біомаса знизилася в 1,4 разу порівняно з контролем. Додавання в середовище культивування Раундапу в концентрації 8 та 16 мл/л призвело до зниження біомаси порівняно з вихідними культурами: в 1,8 та 3,0 рази для *A. chroococcum* ВКМ В-1272, в 1,4 та 2,2 разу – для *Azotobacter* sp. А2 відповідно.

Упродовж другої доби спостерігали зростання біомаси обох культур, проте сенсibiliзовані до Раундапу азотофіксувальні бактерії нагромаджували біомаси менше порівняно з контролем (*A. chroococcum* ВКМ В-1272 – в 1,2 разу, *Azotobacter* sp. А2 – в 1,4 разу). За дії 8 та 16 мл/л Раундапу біомаса обох сенсibiliзованих культур знижувалася порівняно з контролем: у 2,5 та 4,0 рази для *A. chroococcum* ВКМ В-1272, в 2,1 та 3,4 рази – для *Azotobacter* sp. відповідно. Можна припустити, що попереднє культивування бактерій за дії гербіциду підвищує їхню чутливість до препарату, водночас сприяючи формуванню адаптаційних механізмів чи активуванню ферментних систем за умов дефіциту джерел нітрогену.

Бактерії роду *Azotobacter* є вільноживучими діазотрофами, здатними фіксувати атмосферний азот. Вони мають комплекс ферментів, необхідних для процесу діазототрофії: ферредоксини, гідрогенази, нітрогенази. Глі-

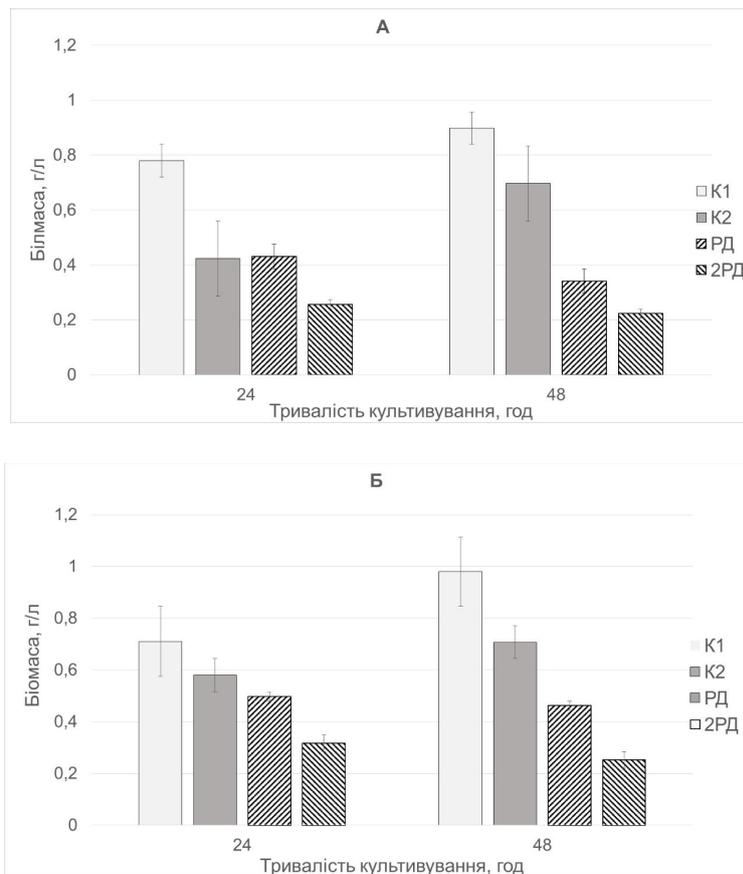


Рис. 5. Вплив Раундапу на нагромадження біомаси бактеріями *Azotobacter chroococcum* ВКМ В-1272 (А) та *Azotobacter* sp. А2 (Б), попередньо вирощеними у середовищі з гербіцидом (К1 – контроль; К2 – культура, сенсibiliзована до Раундапу; РД – рекомендована доза; 2РД – подвійна доза)

фосат не чинить прямої токсичної дії на нітрогеназний комплекс, оскільки не є специфічним інгібітором цих білків. Проте він може діяти опосередковано – порушувати метаболізм клітин, блокуючи шикиматний шлях, оскільки 5-енолпірувілшикимат-3-фосфатсинтаза чутлива до дії гліфосату. На прикладі симбіотичних азотофіксувальних мікроорганізмів *Bradyrhizobium japonicum* показано, що гліфосат знижував кількість бульбочок на коренях сої та вміст у них леггемоглобіну [20].

Відновлення атмосферного азоту до аміаку вільноживучими азотофіксувальними бактеріями роду *Azotobacter* пригнічувалося гербіцидом залежно від його концентрації у середовищі, фази росту культури та сенсibiliзації мікроорганізмів (рис. 6).

Азотофіксувальний потенціал бактерій *Azotobacter* sp. A2, виділених із забрудненого пестицидами ґрунту, виявився дещо вищим як у вихідної, так і в сенсibiliзованій до Раундапу культури порівняно з *A. chroococcum* ВКМ В-1272 – виділені з ґрунту бактерії *Azotobacter* sp. A2 під час росту у середовищі Ешбі нагромаджували в 1,3 разу вищі концентрації йонів амонію порівняно з музейною культурою. Попереднє вирощування бактерій у середовищі з Раундапом зумовило зниження концентрації йонів амонію під час логарифмічної фази росту обох штамів. За дії Раундапу у концентрації 8 та 16 мл/л сенсibiliзовані бактерії *A. chroococcum*

ВКМ В-1272 утворювали відповідно в 1,2 та 1,6 разу менше йонів амонію стосовно контролю. Сенсibiliзовані бактерії *Azotobacter* sp. A2 упродовж першої доби утворювали в 2,7 та 4,3 разу менше йонів амонію порівняно з контролем за впливу Раундапу у рекомендованій та вдвічі вищій концентрації відповідно. Отримані результати дозволяють припустити, що процес діазотрофії у цього штаму є більш чутливим до дії гербіциду порівняно з музейною культурою.

На другу добу концентрація йонів амонію знижувалася порівняно з першою добою і в контролі, і за впливу гербіциду. Причиною цього може бути інгібування нітрогенази утвореними у процесі діазотрофії йонами амонію. Раундап зумовлював дозозалежне зниження концентрації йонів амонію у середовищі росту бактерій. Сенсibiliзовані бактерії *A. chroococcum* ВКМ В-1272 утворювали в 3,4 та 4,2 разу менше йонів амонію за впливу Раундапу у рекомендованій та вдвічі вищій концентрації. Порівняно з вихідною культурою ці показники були нижчими в 5,3 та 6,7 разу відповідно. Бактерії *Azotobacter* sp. A2 на другу добу утворювали в 2,8 та 4,1 разу менше йонів амонію за впливу Раундапу у концентрації 8 та 16 мл/л відповідно. Порівняно з несенсибилизаваною культурою ці показники були нижчими в 3,1 та 4,7 разу. Нітрогеназа є дуже чутливим ферментним комплексом, активність якого залежить

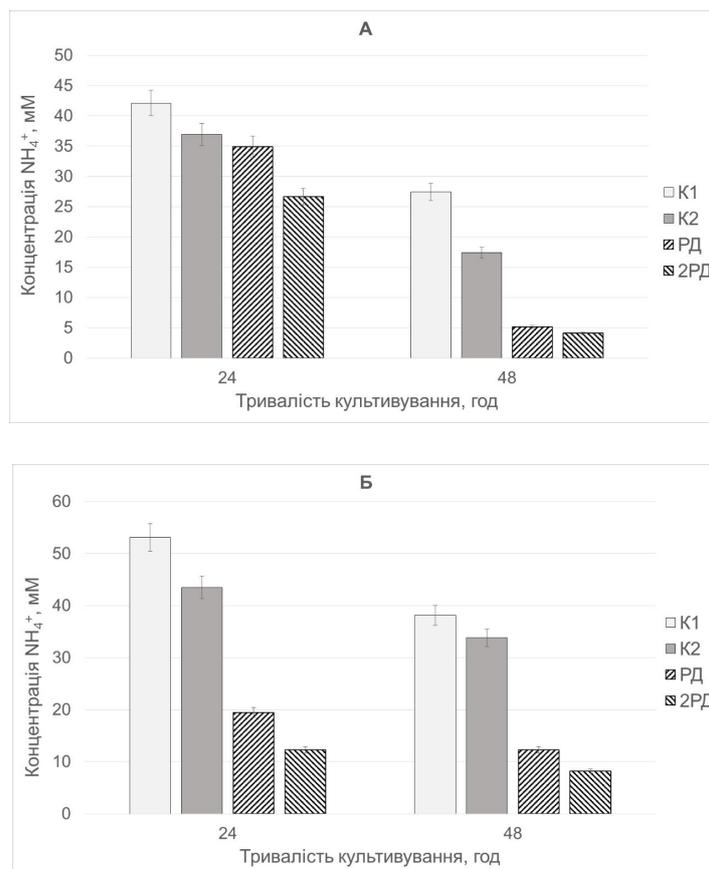


Рис. 6. Вплив Раундапу на утворення йонів амонію бактеріями *Azotobacter chroococcum* ВКМ В-1272 (А) та *Azotobacter* sp. A2 (Б), попередньо вирощеними у середовищі з гербіцидом (К1 – контроль; К2 – культура, сенсibiliзована Раундапом; РД – рекомендована доза; 2РД – подвійна доза)

від концентрації молекулярного кисню, зв'язаних форм нітрогену (нітратів, нітритів, йонів амонію), металів-антагоністів, які витісняють молібден або ферум з активного центру, органічних сполук тощо. Розчинники, емульгатори, стабілізатори, ПАР, які входять до складу пестицидів і перелік яких виробники зазвичай не зазначають на етикетці, можуть негативно впливати на ріст та метаболізм азотофіксуювальних бактерій, зумовлюючи денатурацію білків, порушення проникності й цілісності клітинних мембран, транспорту електронів, блокування FeMo-кофактора. Вплив гербіциду залежить від культури діазотрофа, концентрації гліфосату, кратності його внесення та інших чинників.

Висновки. У роботі продемонстровано чутливість вільноживучих азотофіксуювальних бактерій *A. chroococcum* ВКМ В-1272 та *Azotobacter* sp. А2 до дії гербіциду Раундапу, який широко використовують у сільськогосподарській практиці. Встановлено, що

навіть рекомендовані виробником дози цього препарату здатні інгібувати ріст та утворення йонів амонію мікроорганізмами-діазотрофами за лабораторних умов. Враховуючи здатність гліфосату акумулюватися частинками ґрунту та тривалий період напіврозпаду, ми продемонстрували наслідки для азотофіксуювальних бактерій збільшення концентрації Раундапу та його повторного внесення в ґрунт задля досягнення бажаного гербіцидного ефекту. Неодноразове застосування гербіциду робить мікроорганізми підвищено чутливими до дії гліфосату, що зрештою негативно позначається не тільки на нагромадженні біомаси, але й на процесі діазотрофії. Тому результати, представлені у цій роботі, вказують на важливість дозованого та обґрунтованого застосування гербіцидів на основі гліфосату та перспективність подальшого вивчення їхнього впливу на мікроорганізми ґрунту, що беруть участь у кругообігу нітрогену у природі.

Література:

1. Капустіна К. Захист культур від побічних ефектів: як врятувати і поля, і довкілля. 2021. URL: <https://kurkul.com/>.
2. Державний реєстр пестицидів та агрохімікатів, дозволених до використання в Україні (інтерактивна версія). URL: <https://agrarii-razom.com.ua/derzhavnyj-reyestr-pestycydiv-agrohimiaktiv>.
3. Цибульська С. Підсумки 2024: ринок ЗЗР у грошовому вимірі зменшився, але за обсягами зріс. 2024. URL: <https://agroportal.ua/news/>.
4. Rawat D., Vains A., Chawla P., Kaushik R., Yadav R., Kumar A., Sridhar K., Sharma M. Hazardous impacts of glyphosate on human and environment health: Occurrence and detection in food. *Chemosphere*. 2023. Vol. 329. 138676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138676>.
5. Малярчук М. П., Томницький А. В., Малярчук А. С., Мишукова Л. С. Забур'яненість посівів і продуктивність сівозмін залежно від співвідношення культур і систем обробітку ґрунту на зрошенні півдня України. *Аграрні інновації*. 2020. № 2. С. 56–61. DOI: <https://doi.org/10.32848/agr.innov.2020.2.9>.
6. Білан М. В., Лещова М. О. Корекція мікробіоти кишечника під впливом ксенобіотиків та імуностимуляторів. Монографія. Дніпро, 2022. 128 с.
7. Singh S., Kumar V., Gill J. P. K., Datta S., Singh S., Dhaka V., Kapoor D., Wani A. B., Dhanjal D. S., Kumar M., Narikumar S. L., Singh J. Herbicide Glyphosate: toxicity and microbial degradation. *Int J Environ Res Public Health*. 2020. Vol. 17(20). 7519. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17207519>.
8. Гринько Ю. Особливості десикації. Коли, навіщо і чим? *Агроном*. 2021. URL: <https://www.agronom.com.ua/>.
9. Zioga E., White B., Stout J. C. Glyphosate used as desiccant contaminates plant pollen and nectar of non-target plant species. *Heliyon*. 2022. e12179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12179>.
10. Недопитанська Н.М. Проблема канцерогенної небезпеки гліфосату: нові дані. *Сучасні проблеми токсикології*. 2011. № 1–2. С. 5–15.
11. Pochron S., Simon L., Mirza A., Littleton A., Sahebzada F., Yudell M. Glyphosate but not Roundup® harms earthworms (*Eisenia fetida*). *Chemosphere*. 2020. Vol. 241. 125017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125017>.
12. Zhan H., Feng Y., Fan X., Chen S. Recent advances in glyphosate biodegradation. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2018. Vol. 102(12). P. 5033–5043. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9035-0>.
13. Кузнецова О. М., Чміль В. Д. Гліфосат: поведінка у навколишньому середовищі та рівні залишків. *Сучасні проблеми токсикології*. 2010. № 48(1). С. 87–95.
14. Lupwayi N. Z., Blackshaw R. E., Geddes C. M., Dunn R., Petri R. M. Multi-year and multi-site effects of recurrent glyphosate applications on the wheat rhizosphere microbiome. *Environ Res*. 2022. Vol. 215(Pt 3). 114363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114363>.
15. Vázquez M. B., Moreno M. V., Amodeo M. R., Bianchinotti M. V. Effects of glyphosate on soil fungal communities: A field study. *Rev Argent Microbiol*. 2021. Vol. 53(4). P. 349–358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ram.2020.10.005>.
16. Sumalan R. M., Alexa E., Negrea M., Sumalan R. L., Doncean A., Pop G. Effect of glyphosate on the microbial activity of two Romanian soils. *Commun Agric Appl Biol Sci*. 2010. Vol. 75(2). P. 167–172.
17. Звір Г. І., Мороз О. М., Гнатуш С. О. Дисиміляційна сульфатредукція у бактерій *Desulfovibrio desulfuricans* ІМВ К-6 за впливу гербіцидів Ураган і Раундап. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія : Біологія. Медицина*. 2015. Вип. 6(1). С. 40–44. DOI: <https://doi.org/10.15421/021508>.
18. Гудзь С. П., Гнатуш С. О., Яворська Г. В., Білінська І. С., Борсукевич Б. М. Практикум з мікробіології // Підручник. Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2014. 436 с.
19. Alomari S. M., Hasan R. S., Al-Najim A. N., Saadi A. M. Nitrogen-fixing bacteria and their applications in the environment: A Review. *Int J Med & All Body Health Res*. 2024. Vol. 5, Iss. 4. P. 178–187. DOI: <https://doi.org/10.54660/IJMBHR.2024.5.4.178-187>.

20. Zablotowicz R. M., Reddy K. N. Impact of glyphosate on the *Bradyrhizobium japonicum* symbiosis with glyphosate-resistant transgenic soybean: a minireview. *J Environ Qual*. 2004. Vol. 33(3). P. 825–831. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2004.0825>.

References:

1. Kapustina, K. (2021). Zakhyst kultur vid pobichnykh efektyv: yak vriatuvaty i polia, i dovkillia [Protecting crops from side effects: how to save both fields and the environment]. URL: <https://kurkul.com/> [in Ukrainian].
2. Derzhavnyi reiestr pestytsydiv ta ahrokhimikativ, dozvolenykh do vykorystannia v Ukraini (interaktyvna versiiia). URL: <https://agrarii-razom.com.ua/derzhavnyj-reyestr-pestytsydiv-agrokhimikativ> [in Ukrainian].
3. Tsybul'ska, S. (2024). Pidsumky 2024: rynek ZZR u hroshovomu vymiri zmenshyvsia, ale za obsiahamy zris [Results of 2024: the market for plant protection products decreased in monetary terms but grew in volume]. URL: <https://agroportal.ua/news/> [in Ukrainian].
4. Rawat, D., Bains, A., Chawla, P., Kaushik, R., Yadav, R., Kumar, A., Sridhar, K., Sharma, M. (2023). Hazardous impacts of glyphosate on human and environment health: Occurrence and detection in food. *Chemosphere*, 329, 138676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138676>.
5. Maliarchuk, M. P., Tomnytskyi, A. V., Maliarchuk, A. S., Myshukova, L. S. (2020). Zaburianenist posiviv i produktyvnist sivozmin zalezno vid spivvidnoshennia kultur i system obrobitku gruntu na zroshenni pivdnia Ukrainy [Weed infestation of crops and crop rotation productivity depending on the ratio of crops and tillage systems in irrigated areas of southern Ukraine]. *Ahrarni innovatsii*, 2, 56–61. DOI: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2020.2.9> [in Ukrainian].
6. Bilan, M. V., Lieshchova, M. O. (2022). Korektsiia mikrobioty kyshechnyka pid vplyvom ksenobiotykyv ta imunostymulatoriv [Correction of the intestinal microbiota under the influence of xenobiotics and immunostimulants]. *Monohrafiia*. Dnipro, 128 s. [in Ukrainian].
7. Singh, S., Kumar, V., Gill, J. P. K., Datta, S., Singh, S., Dhaka, V., Kapoor, D., Wani, A. B., Dhanjal, D. S., Kumar, M., Harikumar, S. L., Singh, J. (2020). Herbicide Glyphosate: toxicity and microbial degradation. *Int J Environ Res Public Health*, 17(20), 7519. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17207519>.
8. Hrynko, Yu. (2021). Osoblyvosti desykatsii. Koly, navishcho i chym? [Features of desiccation. When, why and with what?]. *Ahronom*. URL: <https://www.agronom.com.ua/> [in Ukrainian].
9. Zioga, E., White, B., Stout, J. C. (2022). Glyphosate used as desiccant contaminates plant pollen and nectar of non-target plant species. *Heliyon*, e12179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12179>.
10. Nedopytanska, N. M. (2011). Problema kancerogennoi' nebezpeky glifosatu: Novi dani [The problem of cancerogenous danger of glyphosate: New data]. *Suchasni Problemy Toksykologii'*, 1–2, 5–15 [in Ukrainian].
11. Pochron, S., Simon, L., Mirza, A., Littleton, A., Sahebzada, F., Yudell, M. (2020). Glyphosate but not Roundup® harms earthworms (*Eisenia fetida*). *Chemosphere*, 241, 125017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125017>.
12. Zhan, H., Feng, Y., Fan, X., Chen, S. (2018). Recent advances in glyphosate biodegradation. *Appl Microbiol Biotechnol*, 102(12), 5033–5043. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9035-0>.
13. Kuznietsova, O. M., Chmil, V. D. (2010). Hlifosat: povedinka u navkolyshnomu seredovyschchi ta rivni zalyshkiv [Glyphosate: behaviour in the environment and residue levels]. *Suchasni problemy toksykologii*, 48(1), 87–95 [in Ukrainian].
14. Lupwayi, N. Z., Blackshaw, R. E., Geddes, C. M., Dunn, R., Petri, R. M. (2022). Multi-year and multi-site effects of recurrent glyphosate applications on the wheat rhizosphere microbiome. *Environ Res*, 215(Pt 3), 114363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114363>.
15. Vázquez, M. B., Moreno, M. V., Amodeo, M. R., Bianchinotti, M. V. (2021). Effects of glyphosate on soil fungal communities: A field study. *Rev Argent Microbiol*, 53(4), 349–358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ram.2020.10.005>.
16. Sumalan, R. M., Alexa, E., Negrea, M., Sumalan, R. L., Doncean, A., Pop, G. (2010). Effect of glyphosate on the microbial activity of two Romanian soils. *Commun Agric Appl Biol Sci*, 75(2), 167–172.
17. Zvir, G. I., Moroz, O. M., Hnatush, S. O. (2015). Dysymiliatsiina sulfatreduktsiia u bakterii *Desulfovibrio desulfuricans* IMV K-6 za vplyvu herbitysydiv Urahan i Raundap [Dissimilatory sulfate reduction in bacteria *Desulfovibrio desulfuricans* IMV K-6 upon influence of Urahan and Raundap herbicides]. *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu. Seriia : Biolohiia. Medytsyna*. 6(1), 40–44. DOI: <https://doi.org/10.15421/021508> [in Ukrainian].
18. Gudz, S. P., Hnatush, S. O., Yavorska, G. V., Bilinska, I. S., Borsukevych, B. M. (2014). Praktykum z mikrobiologii' [Workshop on microbiology]. Lviv. Nac. Univ. imeni Ivana Franka. Ser. Biol. Stud., Lviv (in Ukrainian). 436 s.
19. Alomari, S. M., Hasan, R. S., Al-Najim, A. N., Saadi, A. M. (2024). Nitrogen-fixing Bacteria and their Applications in the Environment: A Review. *Int J Med & All Body Health Res*, 5(4), 178–187. DOI: <https://doi.org/10.54660/IJMBHR.2024.5.4.178-187>.
20. Zablotowicz, R. M., Reddy, K. N. (2024). Impact of glyphosate on the *Bradyrhizobium japonicum* symbiosis with glyphosate-resistant transgenic soybean: a minireview. *J Environ Qual*, 33(3), 825–831. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2004.0825>.

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 23.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА БІОРІЗНОМАНІТТЯ ПСАМОФІТНИХ ЛУК У ПРИУСЛОВІЙ ЧАСТИНІ Р. ВОРСКЛА

Литвиненко Юлія Іванівна,

кандидат біологічних наук, доцент,
завідувач кафедри біології та методики навчання біології
Сумського державного педагогічного університету імені А. С. Макаренка,
науковий співробітник Гетьманського національного природного парку
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9095-0437>
Scopus Author ID: 57204771998
Web of Science Researcher ID: HKV-8087-2023

Панченко Сергій Михайлович,

доктор біологічних наук, доцент,
начальник науково-дослідного відділу
Національного природного парку Холодний Яр»
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-2612-8784>

Говорун Олександр Володимирович,

кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри біології та методики навчання біології
Сумського державного педагогічного університету імені А.С. Макаренка,
науковий співробітник Гетьманського національного природного парку
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6626-1241>
Scopus Author ID: 58862001300
Web of Science Researcher ID: IWE-3038-2023

Метою дослідження було вивчення прибережних псамофітних лук у заплаві річки Ворскла в межах Гетьманського національного природного парку. Ці угруповання являють собою невеликі за площею, але високо мозаїчні ділянки, які вирізняються значним флористичним багатством, різноманіттям мікобіоти та ентомофауни. У межах досліджуваних територій визначено мозаїчну структуру травостою та варіації продуктивності сирової фітомаси (1,3–3,2 кг/м²), що відповідає 30–70 ц/га сіна. Відсутність господарського використання сприяє накопиченню підстилки, формуванню підросту аборигенних та інвазійних деревно-чагарникових видів і зумовлює потенційні сукцесійні зміни. Найбільше флористичне різноманіття виявлено на тонконогово-гігантськомітлицевих луках, які зберігають вертикальну структуру травостою, тоді як на більш продуктивних угрупованнях, зокрема шорсткоосокових, загальна кількість видів зменшується, проте зростає частка підросту деревних рослин.

Мікобіота псамофітних лук характеризується високою представленістю мікроміцетів, переважно облигатних паразитів вищих рослин (борошнисторосяних та іржастих грибів), асоційованих із трав'янистою рослинністю. Серед сапротрофних і гемібіотрофних мікроміцетів чисельно переважають перитеціодні сумчасті гриби, адаптовані до ксерофітних умов біотопів. Окрему чисельну групу серед сапротрофів становлять копрофільні сумчасті гриби, що розвиваються на посліди диких тварин (зайців та дрібних гризунів). Макроміцети представлені переважно гумусовими сапротрофами з числа агарикоїдних грибів, що свідчить про менш сприятливі умови для їх розвитку на псамофітних луках.

Ентомологічні дослідження зафіксували 138 видів комах із 86 родин та 7 рядів. Ентомокомплекси характеризуються домінуванням фітофагів, серед яких найчисельнішими є представники Hemiptera, Orthoptera та Coleoptera. Значну частку складають ентомофаги (туруни, сонечка, хижі клопи) та запилювачі, включно з дикими бджолами, джмелями та денними метеликами, що формує чітко виражену трофічну структурованість ентомофауни та відображає високу екологічну мозаїчність угруповань.

Отримані результати підкреслюють важливу роль прибережних псамофітних луків річки Ворскла як осередків збереження біорізноманіття. Підтримання стану цих екосистем потребує цілеспрямованих заходів охорони та регуляції сукцесійних процесів, що сприятиме збереженню природних комплексів та підвищенню рекреаційної привабливості Гетьманського національного природного парку.

Ключові слова: приусліві екосистеми, псамофітні біотопи, флора, фауна, мікобіота, структура травостою, охорона природи, Гетьманський національний природний парк, Сумська область.

Lytvynenko Yulia, Panchenko Serhiy, Govorun Oleksandr. Psammophilous meadows in the riparian zone of the Vorskla River

The study aimed to investigate riparian psammophilous meadows in the floodplain of the Vorskla River within the Hetmanskyi National Nature Park. These communities are small in area but highly heterogeneous, characterized by significant floristic richness, diverse mycobiota, and entomofauna. Within the study sites, a mosaic structure of the herb layer and variations in the productivity

of fresh phytomass (1.3–3.2 kg/m², corresponding to 30–70 c/ha of hay) were observed. The absence of economic use promotes litter accumulation, the development of juvenile native and invasive woody-shrub species, and potential successional changes. The highest floristic diversity was found in *Poa pratensis*–*Agrostisgigantea* meadows, which retain the vertical structure of the herb layer, whereas in more productive communities, such as *Carex hirta*-dominated ones, the total number of species decreases but the proportion of woody seedlings increases.

The mycobiota of the psammophilous meadows is characterized by a high prevalence of micromycetes, mainly obligate parasites of higher plants (powdery and rust fungi) associated with herbaceous vegetation. Among saprotrophic and hemibiotrophic micromycetes, perithecioid ascomycetes predominate, adapted to the xerophytic conditions of the habitats. Coprophilous ascomycetes developing on the feces of wild animals (hares and small rodents) constitute a separate numerical group among saprotrophs. Macromycetes are mainly represented by humicolous saprotrophic agaricoid fungi, indicating less favorable conditions for their development in psammophilous meadows.

Entomological studies recorded 138 insect species from 86 families and 7 orders. Insect communities are dominated by phytophagous species, with Hemiptera, Orthoptera, and Coleoptera being the most numerous. Entomophagous species (weevils, ladybirds, predatory bugs) and pollinators, including wild bees, bumblebees, and diurnal butterflies, comprise a significant proportion, resulting in a clearly structured trophic organization of the entomofauna that reflects the high ecological heterogeneity of the communities.

The obtained results highlight the important role of the riparian psammophilous meadows of the Vorskla River as refugia for biodiversity conservation. Maintaining these ecosystems requires targeted conservation measures and the regulation of successional processes, which will contribute to the preservation of natural complexes and enhance the recreational value of the Hetmanskyi National Nature Park.

Key words: riparian ecosystems, psammophilous habitats, flora, fauna, mycobiota, herb layer structure, nature conservation, Hetmanskyi National Nature Park, Sumy Oblast.

Вступ. Річка Ворскла в межах Гетьманського національного природного парку (Охтирський район, Сумська область) вирізняється високим рекреаційним потенціалом, особливо нижче за течією від с. Климентове, у віддаленні від зон бойових дій російсько-української війни. Використання рекреаційного потенціалу річки є важливою складовою діяльності природно-заповідної установи [1]. Водночас активне рекреаційне використання може спричиняти трансформацію природних комплексів, особливо у прибережних зонах, зокрема на псамофітних луках прируслової частини заплави.

Згідно з еколого-фітоценотичною класифікацією рослинності України [2], псамофітна рослинність відноситься до трьох класів: *Koelerio-Corynephoretea canescentis* Klika in Klika & Novák 1941, *Festucetea vaginatae* Soó ex Vičerek 1972 та *Helichryso-Crucianelletea maritimae* Géhu et al. in Sissingh 1974. Відповідно до Національного каталогу біотопів України [3], ці угруповання включені до типу Т1 Сухі трав'яні біотопи підтипу Т1.1 Псамофітні трав'яні біотопи та поділяються на Т1.1.1 Псамофітні трав'яні біотопи на кислих субстратах і Т1.1.12 Псамофітні трав'яні біотопи на нейтральних субстратах.

Псамофітні луки зростають на легких слабозадернованих ґрунтах, відзначаються порівняно низькою продуктивністю, вразливі до вкорінення інвазійних видів та загалом незадовільно відновлюються [4; 5]. Псамофітна рослинність відіграє важливу роль як природний закріплювач рухливих пісків і водночас має естетичну цінність [6; 7]. Окрім цього, вона може слугувати джерелом обмеженого збору лікарських рослин, зокрема цмину піскового (*Helichrysum arenarium* (L.) Moench), фіалки триколірної (*Viola tricolor* L.), звіробою звичайного (*Hypericum perforatum* L.), чебрецю звичайного (*Thymus serpyllum* L.) та ін. [8]. У період інтенсивного розвитку сільського господарства поширенню псамофітної рослинності певною мірою сприяла діяльність

людини, яка призводила до вирубування лісів та випасання худоби, що, своєю чергою, зумовлювало оголення пісків. Проте впродовж останніх двох десятиліть у Європі площі псамофітних угруповань різко скорочуються [9]. Зникнення таких угруповань зумовлюється низькою чинників: забудовою місцезростань, витоптуванням, видобуванням піску та іншими формами рекреаційного навантаження. Крім того, подібні ценози вразливі до змін інтенсивності нітрифікації ґрунтів, а також до заростання наступними в ряду сукцесії типами рослинності [5; 6]. З огляду на це, псамофітні угруповання перебувають під охороною Оселищної Директиви Євросоюзу [10]. Зокрема, до переліку об'єктів охорони віднесено піонерні псамофітні ценози. Також вони охороняються Додатком 1 до Резолюції №4 Бернської конвенції [11].

Стан вивчення біорізноманіття псамофітних біотопів України залишається фрагментарним. Наявні публікації здебільшого присвячені дослідженню рослинного покриву піщаних угруповань окремих регіонів Північного Причорномор'я [12–14], Лісостепу [8; 15; 16] та Полісся [4; 5; 17; 18]. Натомість відомості про фауну [19–22], гриби [23–27] та лишайники [28; 29] залишаються обмеженими, а комплексні оцінки біорізноманіття практично відсутні. Крім того, у більшості робіт відсутні детальні дані щодо вертикальної структури травостою та розподілу надземної сирової фітомаси, що ускладнює всебічну екологічну характеристику та оцінку продуктивності псамофітних угруповань.

Такий стан знань ускладнює розробку ефективних заходів з охорони та управління псамофітними біотопами, які перебувають під загрозою антропогенних та природних факторів. Таким чином, можна констатувати, що континентальні псамофітні угруповання України, з огляду на їхню значну фрагментованість і відносно невеликі площі, потребують подальшого комплексного вивчення. Це дозволить отримати цілісну

картину біорізноманіття та визначити пріоритети для охорони і збереження цих угруповань.

Метою роботи було оцінити біорізноманіття вищих судинних рослин, комах та грибів на псамофітних луках прируслової частини р. Ворскла, які не мають видимих ознак рекреаційної дигресії. Завданнями роботи були: реєстрація поточного стану псамофітних лук, зокрема оцінка видового багатства вищих судинних рослин, комах та грибів; визначення продуктивності надземної фітомаси; ілюстрація вертикальної структури травостанів.

Методика та матеріали досліджень. Польові дослідження проведені 26–27 липня 2025 року на ділянках прируслової частини заплави р. Ворскли в межах Гетьманського національного природного парку. Обстежені території належать до зони стаціонарної рекреації парку.

Оцінку видового багатства вищих судинних рослин здійснено на основі стандартних геоботанічних описів, закладених на облікових ділянках площею 6–10 м². Ілюстрацію вертикальної структури травостою проводили шляхом фотографування на фоні масштабного екрана. Для визначення продуктивності лук відбирали снопики сиріої фітомаси на ділянках розміром 0,25 × 0,25 м у трикратній повторності на тих самих ділянках, де здійснювалося фотографування. Для побудови графіків вертикальної структури зважування снопиків виконували за інтервалами висоти по 10 см, що відповідало масштабу екрана. Загалом обстежено чотири облікові ділянки з візуально різною вертикальною структурою травостою. Досліджені псамофітні луки, що відносяться за Національним каталогом біотопів України (2018) до типу Т1.1.2 Псамофітні трав'яні біотопи на нейтральних субстратах [3]. Серед них було закладено по три ділянки: 1) на токоногово-мітлицевій луці з домінуванням тонконога лучного (*Poa pratensis* L.) та мітлиці гігантської (*Agrostis gigantea* Roth); 2) угрупованні з домінуванням осоки шорсткої (*Carex hirta* L.); 3) у заростях мильнянки лікарської (*Saponaria officinalis* L.).

Збір й опрацювання зразків грибів здійснювалися відповідно до загальноприйнятих у мікології методик [30]. Оскільки колекціонування та підготовка мікологічного матеріалу для подальшого депонування і тривалого зберігання в гербаріях має специфіку залежно від біологічних особливостей, консистенції та будови плодових тіл, морфології спорношень тощо, методи збору та польового опрацювання зразків для фітотрофних мікроміцетів і макроміцетів дещо відрізняються. Зразки фітотрофних мікроміцетів збирали на живих рослинах-господарях разом із частиною органів рослин. У польових умовах їх поміщали в паперові пакети та висушували у ботанічному пресі між листами вологого паперу. Плодові тіла макроміцетів збирали і висушували у відкритих паперових пакетах. Дрібні та середні плодові тіла висушували цілими, а особливо крупні та масивні – розрізали ножем вздовж на дві або більше частин. Для документування та додаткового аналізу використовували цифрові фотографії свіжих плодових тіл у природі.

Визначення грибів проводили на свіжозібраному та гербаризованому матеріалі. Мікроморфометричні ознаки досліджували методом світлової мікроскопії, препарати готували стандартно, у дистильованій воді. Розміри мікроструктур визначали на основі випадково відібраних екземплярів: 20 для спор і конідій та 10 для інших мікроструктур.

Для вивчення різноманіття та структури угруповань комах застосовували два стандартні методи відбору матеріалу: лов сачком та метод косіння ентомологічним сачком. Лов сачком використовували для відлову окремих екземплярів комах, які активно пересуваються в травостої або на квітках. Відбір здійснювали шляхом цілеспрямованого захоплення комах у природних мікробіотопах, що дозволяло зафіксувати видовий склад ентомофауни. Особливу увагу приділяли представникам запилювачів (Lepidoptera, Hymenoptera) та фітофагам. Косіння проводили стандартним ентомологічним сачком із діаметром обода 40 см. Травостій прочісували серіями з 25 помахів, після чого зібраний матеріал переглядали та фіксували. Такий метод дозволяв кількісно охарактеризувати угруповання комах, пов'язаних із рослинним покривом, зокрема представників Coleoptera, Hemiptera, Orthoptera та інших таксонів. Зібраних комах визначали з використанням визначників та порівнянням із колекційними матеріалами [31; 32; 33]. Для подальшого аналізу враховували кількісні та якісні показники ентомофауни, що дозволяло оцінити її видовий склад, різноманіття та екологічні особливості на досліджуваних ділянках псамофітних лук.

Для забезпечення єдності та коректності таксономічного оформлення усіх результатів латинські назви та скорочення авторів видів вищих судинних рослин і грибів, а також латинські назви таксонів комах наведено відповідно до глобальної інформаційної системи з біорізноманіття GBIF (2025) [34].

Результати досліджень. У результаті ботанічних досліджень на псамофітних луках Лівобережного Лісостепу України було охарактеризовано три типи угруповання: тонконогово-гігантськомітлицеве, шорсткоосокове та зарості мильнянки лікарської. Для кожного угруповання визначено висоту травостою, проективне покриття під'ярусів, видовий склад та розподіл надземної сирової фітомаси по вертикальному профілю.

На тонконогово-гігантськомітлицевій луці висота травостою сягала близько 1 м. Під'ярус трав заввишки понад 30 см мав проективне покриття близько 5–10% і складався з поодиноких рослин *Poa pratensis*, *Cichorium intybus* L., *Phleum pratense* L. та ін. Другий під'ярус, заввишки до 30 см, характеризувався проективним покриттям 30–40% і був сформований переважно листками злаків та різнотрав'ям. Найбільше проективне покриття (40–50%) відзначене у нижнього, третього під'ярусу, заввишки до 15 см. Він складався з невисоких рослин і прикореневих розеток *Potentilla impolita* Willd., *Hieracium pilosella* L. та ін. Загальне проективне покриття травостою було відносно невисоким і становило близько 80–85%. Ярус мертвого опад

виражений слабо, його товщина не перевищувала 3–5 см. Загальне видове різноманіття складало 45 видів, серед яких відзначено дрібний підріст *Acer negundo* L. та *Ulmus minor* Mill. Угрупування характеризувалося мозаїчністю, у межах якої виділялися парцели, сформовані *Hieracium pilosella*, злаками та однорічними видами. Більше половини надземної фітомаси зосереджувалося у нижньому ярусі (0–10 см). Загальна сира фітомаса становила 1,3 кг/м².

Шорсткоосокова лука характеризувалася щільним травостоєм із загальним проєктивним покриттям 85–90%. Висота окремих рослин сягала 1,2 м, утворений ними верхній під'ярус мав проєктивне покриття близько 10–15%. Другий під'ярус формували рослини заввишки 40–50 см із сумарним проєктивним покриттям до 60%; саме він був основним у структурі травостою. Нижній під'ярус заввишки до 20 см мав проєктивне покриття 15–20%. Ярус мертвого опадку був доволі потужним і сягав до 10 см завтовшки. На ділянці спостерігався дрібний та середній підріст *Quercus robur* L., *Pyrus communis* L., *Acer tataricum* L., *Ulmus minor* та *Prunus spinosa* L. Видове різноманіття виявилось дещо нижчим порівняно з попередньою ділянкою й становило 30 видів вищих судинних рослин. Основна частка фітомаси була зосереджена на висоті 0–30 см, при цьому не спостерігалось різкого зменшення її кількості знизу вгору по профілю. Загальна сира фітомаса становила 2,4 кг/м².

У заростях *Saponaria officinalis* було зареєстровано 36 видів вищих судинних рослин. Загальна висота травостою сягала 1,4 м, при цьому поодинокі рослини *Rumex thyrsiflorus* Fingerh. формували верхній під'ярус із проєктивним покриттям близько 5%. Другий під'ярус, де домінувала *S. officinalis*, вирізнявся висотою близько 60 см та проєктивним покриттям щонайменше 50%. Третій під'ярус складали рослини заввишки до 20 см із проєктивним покриттям до 40%. Загальне проєктивне покриття травостою становило 90–95%. У вертикальному профілі чітко виокремлювався ярус на висоті 10–30 см, де була зосереджена основна частка сирої фітомаси, представлена здебільшого листям домінанта. Загальна сира фітомаса досягала 3,2 кг/м².

Гриби як невід'ємні компоненти природних біоценозів беруть участь у деструкції органічних решток, регуляції росту й розвитку рослин, формуванні структури та динаміки угруповань. Якщо макроміцети насамперед забезпечують розкладання стійких лігнін-целюлозних сполук і функціонування підстилки, то мікроміцети, зокрема фітопатогени, можуть істотно впливати на формування фітоценозів, пригнічуючи розвиток окремих видів і змінювати співвідношення компонентів рослинного покриву. У сучасній мікології синекологічний підхід, що розглядає грибні угруповання (мікоценози) як невід'ємні структурні та функціональні елементи ґрунтових і наземних біоценозів [35; 36; 37], застосовується дедалі ширше. У цьому контексті дослідження видової різноманітності, екологічної структури та приуроченості грибів до певних біотопів є необхідним складником комплексних оцінок біорізноманіття.

На обстежених ділянках псамофітних лук зареєстровано 29 видів грибів, що належать до 20 родів, 15 родин та 8 порядків [38]. Серед них сумчасті (Ascomycota) представлені 17 видами з 12 родів, а базидієві (Basidiomycota) – 12 видами з 8 родів. Найбільшу частку становили порядки Pucciniales (7 видів), Helotiales (6), Agaricales (5), Pleosporales (4) та Mycosphaerellales (3), тоді як інші порядки були представлені 1–2 видами.

За еколого-трофічною належністю переважали біотрофи та сапротрофи. Група біотрофів включала 13 видів облигатних паразитів вищих рослин, сапротрофи – 12 видів, що належали до герботрофів, копротрофів та гумусових сапротрофів. Для чотирьох видів відзначено гемібіотрофний тип живлення. Розподіл грибів між угрупованнями був нерівномірним: на тонконогово-гігантськомітлицевій луці виявлено 18 видів, на шорсткоосоковій – 13, а в заростях *Saponaria officinalis* – лише 3. Це свідчить про відмінності мікологічного складу залежно від типу угруповання, видової структури рослин-живителів та особливостей травостою.

У лучних угрупованнях помітну частку складають мікроміцети, здебільшого асоційовані з трав'янистими рослинами. Найбільш поширеними серед них є облигатні паразити, пов'язані з лучною рослинністю, зокрема борошністоросні (Helotiales, Erysiphaceae) та іржасті гриби (Pucciniales). На досліджених ділянках відзначено поширення таких видів: *Blumeria graminis* (DC.) Speer на *Poa pratensis* та *Phleum pratense*, *Erysiphe triflorum* (Wallr.) U. Braun на *Trifolium pratense* L., *Melampsora euphorbiae* (Ficinus & C. Schub.) Castagne на *Euphorbia* sp., *Phragmidium potentillae* (Pers.) P. Karst. на *Potentilla impolita*, *Puccinia oreoselini* (F. Strauss) Fuckel на *Peucedanum oreoselinum* (L.) Moench та *Uromyces trifolii-repentis* (Castagne) Liro на *Trifolium repens* L.

Псамофітні трав'яні біотопи також сприяють поширенню гемібіотрофних філо- та гербофільних сумчастих грибів завдяки низькій вологості та розрідженому травостою. За сприятливих умов ці мікроміцети можуть масово розвиватися, спричиняючи плямистості та відмирання листків. Здатність до гемібіотрофії та широка субстратна приуроченість забезпечують поширення локулоаскомітетів у псамофітних фітоценозах [23; 25]. У наших обстеженнях виявлено лише два види роду *Septoria*: *S. stenactidis* Vill. на *Stenactis annua* (L.) Nees та *S. scabiosicola* Desm. на *Knautia arvensis* (L.) Coult.

На деревних рослинах, що формують дрібний і середній підріст в обстежених угрупованнях, виявлено чотири види мікроміцетів: *Gymnosporangium sabinae* (Dicks.) G. Winter та *Mycosphaerella pyri* (Auersw.) Voerema на листках *Pyrus communis*, *Rhytisma punctatum* (Pers.) Fr. на листках *Acer tataricum* і *Sawadaea bicornis* (Wallr.) Nomma на *Acer negundo* L.

Загалом фітотрофні мікроміцети відмічені на 18 видах судинних рослин із 10 родин, серед яких найбільше представлені Asteraceae, Poaceae, Rosaceae та Fabaceae.

Окрему увагу привертає група копрофільних мікроміцетів, що колонізують екскременти, переважно

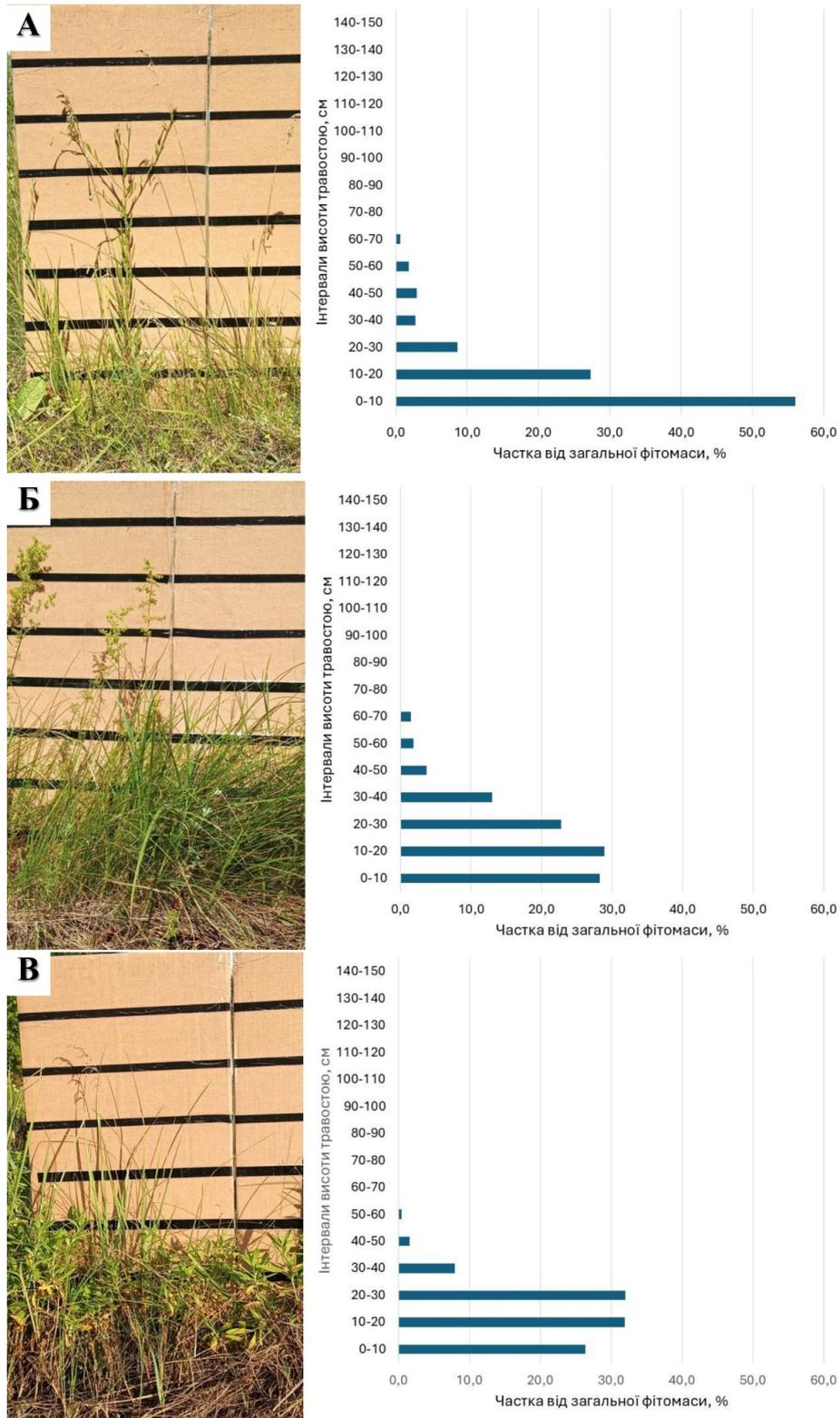


Рис. 1. Вертикальна структура травостою на досліджуваних ділянках лук: **А** – тонконогово-гігантськомітлицевої; **Б** – шорсткоосокової, **В** – заростей мильнянки лікарської (*Saponaria officinalis* L.).

травоїдних тварин. Досліджені ділянки лук нині не використовуються для випасу худоби, тому основним субстратом для розвитку копрофільних грибів виступає послід диких тварин, насамперед зайців (*Lepus europaeus* Pallas) та дрібних гризунів. На тонконово-

во-гігантськомітлицевій та шорсткоосокової луках зібрано численні копрони зайців, на яких методом вологої камери виявлено сім видів сумчастих грибів із числа пірено- та локулоаскомітетів: *Botryotrichum murorum* (Corda) X. Wei Wang & Samson, *Coniochaeta*

leucoplaca (Sacc.) Cain, *Delitschia marchalii* Berl. & Voglino, *Preussia dubia* (S.I. Ahmed & Cain) Kruys, *Sordaria fimicola* (Roberge ex Desm.) Ces. & De Not., *Sporormiella intermedia* (Auersw.) S.I. Ahmed & Cain ex Kobayasi та *S. minima* (Auersw.) S.I. Ahmed & Cain. Усі виявлені види є звичайними для України [39; 40] і часто трапляються у псамофітних біотопах. Копрофільних дискосмітетів не виявлено, що узгоджується з нашими попередніми даними [27]. Раніше ми відзначали, що екологічні умови аренних територій є сприятливішими для розвитку перитеціодних аскомітетів [27]; їх поширення у псамофітних угрупованнях також підтверджене іншими дослідниками [23; 25]. Імовірно, сумчасті гриби із замкненими асками (піреноміцети, локулоаскоміцети), завдяки захищеному споровому апарату, менш чутливі до несприятливих екологічних чинників піщаних арен, що й забезпечує їх поширення.

Макроміцети обстежених псамофітних лучних ділянок Гетьманського НПП представлені шістьма видами з п'яти родів та чотирьох родин порядку Agaricales. Це переважно представники гумусових сапротрофів, серед яких доволі звичайними є *Agaricus campestris* L., *Lycoperdon pratense* Pers. та *Marasmius oreades* (Bolton) Fr. Серед герботрофів зафіксовано *Marasmius limosus* Quél.

Важливим компонентом біорізноманіття псамофітних лук є ентомофауна. Ентомологічні дослідження прирусової частини р. Ворскла показали високе різноманіття комах, що відображає екологічну мозаїчність та значну природоохоронну цінність даних біотопів. Загалом було зареєстровано 138 видів комах, що належать до 86 родин і 7 рядів. Найчисельніше представлені ряди Hymenoptera, Hemiptera, Orthoptera, Coleoptera та Lepidoptera, що формують основу ентомокомплексів псамофітних лук.

Метод косіння дозволив встановити переважання у фауні комах, тісно пов'язаних із трав'янистою рослинністю. У зразках домінували різні групи фітофагів, зокрема: клопи-щитники – *Eurydema oleracea* Linnaeus, 1758 та *Dolycoris baccarum* Linnaeus, 1758; прямокрилі – *Chorthippus parallelus* Zetterstedt, 1821 і *Tettigonia viridissima* Linnaeus, 1758; твердокрилі – *Galeruca tanacetii* Linnaeus, 1758 та *Phyllotreta vittula* Redtenbacher, 1849. Виявлено також значну кількість ентомофагів: сонечка – *Coccinella septempunctata* Linnaeus, 1758, *Propylea quatuordecimpunctata* Linnaeus, 1758, *Harmonia axyridis* Pallas, 1773; туруни – *Harpalus rufipes* DeGeer, 1774; хижі клопи – *Picromerus bidens* Linnaeus, 1758. Це відображає трофічну структурованість ентомокомплексів псамофітних лук.

Лов сачком виявився ефективним методом для обліку запилювачів. Серед них відзначено значну представленість диких бджіл – *Andrena* spp., *Halictus* spp.; джмелів – *Bombus terrestris* Linnaeus, 1758, *Bombus lapidarius* Linnaeus, 1758; а також денних метеликів – *Pieris rapae* Linnaeus, 1758, *Vanessa cardui* Linnaeus, 1758, *Aglais urticae* Linnaeus, 1758, *Maniola jurtina* Linnaeus, 1758. Їхня активність була особливо високою на ділянках із розвиненим квітковим покривом, що підтверджує роль

псамофітних лук як важливих осередків підтримання популяцій запилювачів.

Аналіз структури ентомокомплексів показав, що найбільшу частку видового багатства становлять фітофаги (до 57%), далі – ентомофаги та запилювачі. Регіонально рідкісних видів та видів, занесених до Червоної книги України, у ході досліджень не виявлено.

Висновки. Прибережні луки у заплаві р. Ворскла в межах Гетьманського НПП являють собою невеликі за площею ділянки, доволі мозаїчні за типологічним складом, які в наш час не використовуються з господарською метою навіть у господарській зоні. Продуктивність сиріої фітомаси на досліджених нами ділянках склала близько 1,3, 2,4 та 3,2 кг/м². Це відповідає 30–70 ц/га сіна. Не використання цієї фітомаси призводить до утворення достатньо потужної підстилки, зміну мікроклімату. Також сусідство з природними лісами та берегозахисними насадженнями сприяє появі підросту аборигенних та інвазійних дерев. Накопичення підстилки та наявність підросту дерев та чагарників є передумовами подальших сукцесійних змін. Поява такого адвентивного виду як *Saponaria officinalis* суттєво змінює вертикальну структуру, притаманну угрупованням з домінуванням злакоподібних трав. Найбільше видове різноманіття зареєстровано саме на тонконогово-гігантськомітлицевій луці, яка характеризується найнижчою продуктивністю, але характерною для лук вертикальною структурою. На більш високопродуктивних луках, де накопичується більше підстилки, як у нашому випадку на шорсткоосоковій, зменшується загальне видове різноманіття, але зростає кількість видів підросту дерев та чагарників.

Важливою складовою екологічної структури цих угруповань є гриби, різноманіття яке відображає закономірності взаємодії з трав'янистою та деревною рослинністю. Серед виявлених видів грибів переважну частку становлять мікроміцети, здебільшого облігатні паразити вищих рослин (борошнесторосяні та іржасті гриби), що асоційовані з трав'янистими рослинами. Серед сапротрофів і гемібіотрофів домінують перитеціодні аскоміцети (пірено- та локулоаскоміцети), для яких замкнені плодові тіла забезпечують захист спорового апарату, а ксерофітні умови псамофітних біотопів сприятливі для розвитку та розповсюдження. На деревних рослинах представлені лише поодинокі види мікроміцетів. Дикі тварини (зайці та дрібні гризуни), що мешкають, харчуються та пересуваються по досліджених ділянках, залишаючи послід, сприяють поширенню у цих угрупованнях копрофільних сумчастих грибів. Макроміцети трапляються рідко і переважно представлені видами агарикоїдних грибів з числа гумусових сапротрофів, що свідчить про менш сприятливі умови псамофітних лук для їх розвитку. Розподіл видів між угрупованнями нерівномірний і залежить від типу угруповання, структури травостою та присутності підросту дерев і чагарників.

Ентомофауна псамофітних луків прирусової частини р. Ворскла відзначається високим видовим різноманіттям. Основну частину складають фітофаги,

а також представлені численні ентомофаги та запилювачі, серед яких значну роль відіграють дикі бджоли, джмелі та денні метелики. Така структура свідчить про важливу роль цих луків як осередків існування комах, тісно пов'язаних із трав'янистою рослинністю, і забезпечує стабільність популяцій різних трофічних груп. Загалом спостережуване видове різноманіття демонструє добре збалансовану структуру ентомокомплексів.

Ефективна охорона псамофітних рослинних угруповань прируслової частини р. Ворскла сприятиме збереженню та підвищенню рекреаційної привабливості Гетьманського національного природного парку

за умови організації потоку відвідувачів, за потреби, на обмежених ділянках проводити регуляційні заходи для контролю сукцесійних процесів і підтримання поточного рівня біорізноманіття.

Дослідження виконано в рамках проекту «Збереження та відтворення степів і диверсифікація використання фітомаси для енергетичних цілей», що реалізується ГО «Мережа екостанцій України» за грантової підтримки Європейського Союзу через Громадську організацію «Центр екологічних ініціатив Екодія» та чеську гуманітарну організацію «Людина в біді» (People in Need Ukraine).

Література:

1. Скарби природи Ворсклянського краю / [М. П. Книш та ін.]; за заг. ред. М. П. Книша; Гетьманський нац. природ. парк. Суми : Університетська книга, 2022. 171 с.
2. Дубина Д.В., Дзюба Т.П., Ємельянова С.М., Багрікова Н.О., Борисова О.В. та ін. Продромус рослинності України. Ред. Дубина Д.В., Дзюба Т.П. Київ : Наукова думка, 2019. 784 с.
3. Національний каталог біотопів України / За ред. А. А. Куземко, Я. П. Дідуха, В.А. Онищенко, Я. Шеффера. Київ : ФОП Клименко Ю. Я., 2018. 442 с.
4. Danko H., Lukash O., Morozova I., Boiko V., Yakovenko O. The meadow, psammophytic and ruderal plant communities with *Solidago canadensis* L. in Chernihiv Polesie (Ukraine). *Studia Quaternaria*. 2021. 38(2). С. 149–158. <https://doi.org/10.24425/sq.2021.136832>
5. Danko H. Biotopes of sand of Chernihiv Polesie (Forest zone, Northern Ukraine). *Studia Quaternaria*. 2023. 40(2). С. 77–91. <https://doi.org/10.24425/sq.2023.148034>
6. Екомережа степової зони України: принципи створення, структура, елементи / Ред. д-р біол. наук, проф. Д.В. Дубина, д-р біол. наук, проф. Я.І. Мовчан. Київ : LAT & K, 2013. 409 с.
7. Wysocki Cz., Sikorski P. Fitosocjologia stosowana w ochronie i kształtowaniu krajobrazu. Wydanie III, 2014. 504 с.
8. Давидова А.О., Давидов Д.А., Пархоменко М.О. Попередні дані про псамофітну рослинність національного природного парку «Дворічанський» (Харківська обл.) та його околиць. *Природничий альманах. Серія: Біологічні науки*. 2021. № 31. С. 23–34. <https://doi.org/10.32999/ksu2524-0838/2021-31-3>
9. Wysocki Cz., Sikorski P. Fitosocjologia stosowana w ochronie i kształtowaniu krajobrazu. Wyd. SGGW, Warszawa, 2009. 498 с.
10. European Union. Council Directive 92/43/EEC of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora. Official Journal of the European Communities. 1992. L 206, 7–50.
11. Council of Europe. Resolution No. 4 (1996) of the Standing Committee to the Bern Convention on the conservation of European wildlife and natural habitats on the listing of endangered natural habitat types requiring specific conservation measures (Appendix 1). Strasbourg, 1996.
12. Dubyna D.V., Neuhäuslova Z., Shelyag-Sosonko Yu.R. Vegetation of the Birjucij Island Spit in Azov Sea. Sand Steppe Vegetation. *Folia Geobotanica et Phytotaxonomica*. 1995. 30. P. 1–31.
13. Мойсієнко І.І., Захарова М.Я., Мельник Р.П., Садова О.Ф. Анотований список флори урочища Буркутські плавні (Херсонська область, Україна). *Чорноморський ботанічний журнал*. 2018. 14(1). С. 6–25. <https://doi.org/10.14255/2308-9628/18.141/1>
14. Давидова А.О. Синтаксономія рослинності національного природного парку «Джарилгацький». Клас Festucetea vaginatae. *Біологія та екологія*. 2019. Том 5, №1. С. 34–43. <https://doi.org/10.33989/2414-9810.2019.5.1.195113>
15. Гайова Ю.Ю. Псамофітна рослинність Черкасько-Чигиринського геоботанічного району. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2015. 25(9). С. 131–138.
16. Гапон С.В. Бріоугруповання природних типів рослинності Лісостепу України. *Чорноморський ботанічний журнал*. 2013. 9(2). С. 257–264.
17. Lukash O., Danko H. The vegetation of sands in the Chernihiv city (Ukraine). *Studia Quaternaria*. 2020. 37(1). С. 31–44.
18. Danko H. Floristic structure of sand communities of Chernihiv Polissya. *Scientific Bulletin of Natural Sciences (Biological Sciences)*. 2023. 35. С. 16–36. <https://doi.org/10.32999/ksu2524-0838/2023-35-2>
19. Канарський Ю.В. Класифікація біотопів денних лускокрилих (Lepidoptera, Diurna) та оцінка репрезентативності їх видового складу. *Наукові записки Державного природознавчого музею*. 2004. 19. С. 139–148.
20. Говорун О.В., Гудім А.О. До вивчення вогнівок (Lepidoptera, Ryalidae) природоохоронного науково-дослідного відділення «Буркути» Національного природного парку «Олешківські піски». *Природничі науки: Збірник наукових праць*. Суми : Вид-во СумДПУ імені А.С. Макаренка, 2017. Випуск 14. С. 19–22.
21. Говорун О.В. Обґрунтування створення ентомологічного заказника місцевого значення «Білі гори». *Природничі науки: Збірник наукових праць*. Суми : Вид-во СумДПУ імені А.С. Макаренка, 2019. Випуск 16. С. 45–51. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3551450>

22. Вертель В.В., Говорун О.В., Вертель Г.І. До наукової характеристики проектованого ландшафтного заказника місцевого значення «Білі гори». Освітні та наукові виміри природничих наук : збірник матеріалів II Всеукраїнської заочної наукової конференції, м. Суми, 8 грудня 2021 р. Суми : СумДПУ імені А.С.Макаренка, 2021. С. 231.
23. Корольова О.В. Аскоміцети Каховської та Виноградівської арен Нижньодніпровських пісків. *Український ботанічний журнал*. 1999. 56(5). С. 490–496.
24. Heluta V., Hayova V., Tykhonenko Yu., Dzhagan V., Umanets O. Microfungi on plants from Tendra Island (Ukraine, Black Sea). *Polish Botanical Journal*. 2010. 55(2). С. 441–449.
25. Корольова О.В. Видова різноманітність локулоаскоміцетів Національного природного парку «Олешківські піски» (Херсонська область, Україна). *Чорноморський ботанічний журнал*. 2015. 11(2). С. 223–229. <https://doi.org/10.14255/2308-9628/15.112/7>
26. Акулов О.Ю., Леонтьев Д.В., Савченко А.О., Усиченко А.С., Шлахтер М.Л., Яцюк І.І. Матеріали до мікофлори Національного природного парку «Олешківські піски» та прилеглих територій (Херсонська область, Україна). *Чорноморський ботанічний журнал*. 2016. 12(2). С. 178–190. <https://doi.org/10.14255/2308-9628/16.122/7>
27. Литвиненко Ю.І., Романова Д.А., Орлова-Гудім К.С., Гудім А.О., Вакал А.П. Копрофільні аскоміцети Національного природного парку «Олешківські піски» (Херсонська область, Україна). *Чорноморський ботанічний журнал*. 2021. 17(1). С. 81–91. <https://doi.org/10.32999/ksu1990-553X/2021-17-1-6>
28. Ходосовцев О.Є., Ходосовцева Ю.А. Лишайники та ліхенофільні гриби національного природного парку «Олешківські піски» (Херсонська область, Україна). *Чорноморський ботанічний журнал*. 2015. 11(1). С. 51–56. <https://doi.org/10.14255/2308-9628/15.111/5>
29. Ходосовцев О.Є., Бойко М.Ф., Надеїна О.В., Ходосовцева Ю.А. Лишайникові та мохові угруповання нижньодніпровських арен: синтаксономія та індикація дефляційних процесів. *Чорноморський ботанічний журнал*. 2011. 7(1). С. 44–66.
30. Senanayake I.C., Rathnayaka A.R., Marasinghe D.S., Calabon M.S., Gentekaki E., Lee H.B., Hurdeal V.G., Pem D., Dissanayake L.S., Wijesinghe S.N., Bundhun D., Nguyen T.T., Jeewon R., Bhat D.J., Xiang M.M. Morphological approaches in studying fungi: collection, examination, isolation, sporulation and preservation. *Mycosphere*. 2020. 11(1). С. 2678–2754. <https://doi.org/10.5943/mycosphere/11/1/20>
31. Матушкіна Н. Бабки (Odonata) Центральної України: Польовий атлас-визначник найпоширеніших видів: довідник. Київ : Талком, 2020. 104 с.
32. Некрутенко Ю., Чиколовец В. Денні метелики України (серія «Природа України»). Київ : Вид-во Раєвського, 2005.
33. iNaturalist (2025). iNaturalist – Community Science Platform. URL: <https://www.inaturalist.org> (дата звернення: 13.08.2025).
34. GBIF (2025). Global Biodiversity Information Facility – International Open Data Infrastructure. URL: <https://www.gbif.org> (дата звернення: 20.08.2025).
35. Дудка І.О., Сміцька М.Ф., Смик Л.В., Мережка Т.О. Деякі теоретичні питання мікоценології. 1. Мікоценоз і мікосинузія. *Український ботанічний журнал*. 1976. 33(1). С. 12–20.
36. Дудка І.О., Тихоненко Ю.Я., Бурдюкова Л.І. Гербофільні та філофільні мікосинузії паразитних мікроміцетів в УРСР. *Український ботанічний журнал*. 1990. 47(4). С. 5–9.
37. Слюсаренко О.М., Кривицька Т.М., Єрмолаєва О.Ю., Немерцалова С.В. Мікоценоз філосфери шпилькових і злаків у ботанічному саду ОНУ ім. І.І. Мечникова. *Вісник Одеського національного університету. Біологія*. 2006. 11(6). С. 129–134.
38. Hyde K.D., Noorabadi M.T., Thiyagaraja V., He M.Q. et al. The 2024 Outline of Fungi and fungi-like taxa. *Mycosphere*. 2024. 15(1). С. 5146–6239. <https://doi.org/10.5943/mycosphere/15/1/25>
39. Lytvynenko Yu.I., Hayova V.P. New and noteworthy records of coprophilous species of Coniochaeta and Sordaria (Sordariomycetes, Ascomycota) from Ukraine. *Український ботанічний журнал*. 2018. 75(6). С. 538–551. <https://doi.org/10.15407/ukrbotj75.06.538>
40. Lytvynenko Yu.I., Hayova V.P., Akulov O.Yu., Dzhagan V.V., Romanova D.A. An update on the occurrence of the Sporormiaceae (Pleosporales) in Ukraine. *Czech Mycology*. 2022. 74(2). С. 195–226. <https://doi.org/10.33585/cmy.74206>

References:

1. Knysh, M.P. (Ed.). (2022). Skarby pryrody Vorsklianskoho kraiu [Treasures of nature of the Vorskla region]. Sumy: Universytetska knyha, 171 p. [in Ukrainian].
2. Dubyna, D.V., Dziuba, T.P., Yemelianova, S.M., Bahrikova, N.O., Borysova, O.V., et al. (2019). Prodrum roslynnosti Ukrainy [Prodrum of the vegetation of Ukraine]. Kyiv: Naukova dumka, 784 p. [in Ukrainian].
3. Kuzemko, A.A., Didukh, Ya.P., Onyshchenko, V.A., Sheffer, Ya. (Eds.). (2018). Natsionalnyi katalog biotopiv Ukrainy [National catalogue of biotopes of Ukraine]. Kyiv: FOP Klymenko Yu.Ya., 442 p. [in Ukrainian].
4. Danko, H., Lukash, O., Morozova, I., Boiko, V., & Yakovenko, O. (2021). The meadow, psammophytic and ruderal plant communities with *Solidago canadensis* L. in Chernihiv Polesie (Ukraine). *Studia Quaternaria*, 38(2), pp. 149–158. <https://doi.org/10.24425/sq.2021.136832>
5. Danko, H. (2023). Biotopes of sand of Chernihiv Polesie (Forest zone, Northern Ukraine). *Studia Quaternaria*, 40(2), pp. 77–91. <https://doi.org/10.24425/sq.2023.148034>
6. Dubyna, D.V., & Movchan, Ya.I. (Eds.). (2013). Ekomerezha stepovoi zony Ukrainy: pryntsyipy stvorennia, struktura, elementy [Econet of the steppe zone of Ukraine: principles of formation, structure and elements]. Kyiv: LAT & K, 409 p. [in Ukrainian].

7. Wysocki, C., & Sikorski, P. (2014). Fitosocjologia stosowana w ochronie i kształtowaniu krajobrazu [Applied phytosociology in landscape protection and management] (3rd ed.). 504 p. [in Polish].
8. Davidova, A.O., Davidov, D.A., & Parkhomenko, M.O. (2021). Poperedni dani pro psamofitnu roslynist Natsionalnoho pryrodnoho parku "Dvorichanskyi" (Kharkivska obl.) ta yoho okolyts [Preliminary data on psammophytic vegetation of Dvorichanskyi National Nature Park (Kharkiv region) and its surroundings]. *Pryrodnychiy almanakh. Series: Biological sciences*, 31, pp. 23–34. <https://doi.org/10.32999/ksu2524-0838/2021-31-3> [in Ukrainian].
9. Wysocki, C., & Sikorski, P. (2009). Fitosocjologia stosowana w ochronie i kształtowaniu krajobrazu [Applied phytosociology in landscape protection and management]. Warszawa: SGGW, 498 p. [in Polish].
10. European Union. (1992). Council Directive 92/43/EEC of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora. *Official Journal of the European Communities*, L 206, pp. 7–50.
11. Council of Europe. (1996). Resolution No. 4 (1996) of the Standing Committee to the Bern Convention on the conservation of European wildlife and natural habitats on the listing of endangered natural habitat types requiring specific conservation measures (Appendix 1). Strasbourg.
12. Dubyna, D.V., Neuhäuslova, Z., & Shelyag-Sosonko, Yu.R. (1995). Vegetation of the Birjucij Island Spit in Azov Sea. Sand steppe vegetation. *Folia Geobotanica et Phytotaxonomica*, 30, pp. 1–31.
13. Moysiienko, I.I., Zakharova, M.Ya., Melnik, R.P., & Sadova, O.F. (2018). Anotovanyi spysok flory urochyshcha Burkuts'ki plavni (Khersonska oblast', Ukraina) [An annotated list of the flora of the landmark Burkuty Plavni (Kherson region, Ukraine)]. *Chornomors'k botanical journal*, 14(1), pp. 6–25. <https://doi.org/10.14255/2308-9628/18.141/1> [in Ukrainian].
14. Davidova, A.O. (2019). Syntaxonomiia roslynnosti Natsionalnoho pryrodnoho parku "Dzharylhatskyi". Klass Festucetea vaginatae [Syntaxonomy of vegetation in Dzharylhak National Nature Park. Class Festucetea vaginatae]. *Biology and Ecology*, 5(1), pp. 34–43. <https://doi.org/10.33989/2414-9810.2019.5.1.195113> [in Ukrainian].
15. Hayova, Y.Y. (2015). Psamofitna roslynnist Cherkas'ko-Chyhyryns'koho heobotanichnoho raionu [Psammophytic vegetation of the Cherkasy-Chyhyryn geobotanical region]. *Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine*, 25(9), pp. 131–138. [in Ukrainian]
16. Gapon, S.V. (2013). Briuhropovannia pryrodnykh typiv roslynnosti Lisostepu Ukrainy [Bryocommunities of natural vegetation types of the Ukrainian Forest-Steppe]. *Chornomors'k botanical journal*, 9(2), pp. 257–264. [in Ukrainian].
17. Lukash, O., & Danko, H. (2020). The vegetation of sands in the Chernihiv city (Ukraine). *Studia Quaternaria*, 37(1), 31–44.
18. Danko, H. (2023). Floristic structure of sand communities of Chernihiv Polissya. *Scientific Bulletin of Natural Sciences (Biological Sciences)*, 35, 16–36. <https://doi.org/10.32999/ksu2524-0838/2023-35-2>
19. Kanarsky, Y.V. (2004). Klasifikatsiia biotopiv dennykh luskokrylykh (Lepidoptera, Diurna) ta otsinka reprezentatyvnosti yikh vydivoho skladu [Classification of the community habitats of the butterflies (Lepidoptera, Diurna) and estimation of their species composition representativeness]. *Proceedings of the State Natural History Museum, Lviv*, 19, pp. 139–148. [in Ukrainian]
20. Govorun, O.V., & Hudim, A.O. (2017). Do vvychennia vohnivok (Lepidoptera, Pyralidae) pryrodookhoronnoho naukovo-doslidnoho viddillennia "Burkuty" Natsionalnoho pryrodnoho parku "Oleshkivski Pisky" [To study moth butterflies (Lepidoptera, Pyralidae) in the territory of the environmental research department "Burkuty" of the Oleshkivski Pisky National Nature Park]. *Prirodnichi nauki*, 14, pp. 19–22. [in Ukrainian].
21. Govorun, O.V. (2019). Obgruntuvannia stvorennia entomolohichnoho zakaznyka mistsevoho znachennia "Bili Hory" [Justification for the establishment of an entomological reserve of local importance "Bili Hory"]. *Prirodnichi nauki*, 16, 45–51. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3551450> [in Ukrainian].
22. Vertel, V.V., Govorun, O.V., & Vertel, H.I. (2021). Do naukovoï kharakterystyky proektovanoho landshaftnoho zakaznyka mistsevoho znachennia "Bili Hory" [On the scientific characterization of the projected landscape reserve of local importance "Bili Hory"]. In *Osvitni ta naukovi vymiry pryrodnych nauk: zbirnyk materialiv II Vseukrainskoi zazochnoi naukovoï konferentsii*, Sumy, 8 December 2021, pp. 231. Sumy: SumDPU named after A.S. Makarenka [in Ukrainian].
23. Korol'ova, O.V. (1999). Askomitsety Kakhovs'koi ta Vynohradivs'koi aren Nyzhodniprovskykh piskiv [The Ascomycetes of the Kakhovka and Vinogradiv sandy arenas of the lower Dnipro]. *Ukrainian Botanical Journal*, 56(5), pp. 490–496. [in Ukrainian].
24. Heluta, V., Haieva, V., Tykhonenko, Y., Dzhagan, V., & Umanets, O. (2010). Microfungi on plants from Tendra Island (Ukraine, Black Sea). *Polish Botanical Journal*, 55(2), 441–449.
25. Korolyova, O.V. (2015). Vydova riznomanitnist' lokuloaskomitsetiv Natsional'noho pryrodnoho parku "Oleshkivski Pisky" (Khersonska oblast', Ukraina) [The loculoascomycete species diversity of National Park "Oleshkivski Pisky" (Kherson region, Ukraine)]. *Chornomors'k Botanical Journal*, 11(2), pp. 223–229. <https://doi.org/10.14255/2308-9628/15.112/7> [in Ukrainian].
26. Akulov, O.Yu., Leontyev, D.V., Savchenko, A.O., Usichenko, A.S., Shlahter, M.L., & Yatsyuk, I.I. (2016). Materialy do mikrobioty Natsional'noho pryrodnoho parku "Oleshkivski Pisky" ta prylehlykh terytoriy (Khersonska oblast', Ukraina) [Materials for the mycobiota of the National Natural Park "Oleshkivski Pisky" and the surrounding areas (Kherson region, Ukraine)]. *Chornomors'k Botanical Journal*, 12(2), pp. 178–190. <https://doi.org/10.14255/2308-9628/16.122/7> [in Ukrainian].
27. Lytvynenko, Yu.I., Romanova, D.A., Orlova-Hudim, K.S., Hudim, A.O., & Vakal, A.P. (2021). Koprofil'ni askomitsety Natsional'noho pryrodnoho parku "Oleshkivski Pisky" (Khersonska oblast', Ukraina) [Coprophilous

ascomycetes of the Oleshkivski Pisky National Nature Park (Kherson region, Ukraine)]. *Chornomors'k Botanical Journal*, 17(1), pp. 81–91. <https://doi.org/10.32999/ksu1990-553X/2021-17-1-6> [in Ukrainian].

28. Khodosovtsev, O.Ye., & Khodosovtseva, Yu.A. (2015). Lyshaiynyky ta likhenofil'ni hryby Natsional'noho pryrodnoho parku "Oleshkivski Pisky" (Khersonska oblast', Ukraina) [The lichens and lichenicolous fungi of National Nature Park "Oleshkivski Pisky" (Kherson region, Ukraine)]. *Chornomors'k Botanical Journal*, 11(1), pp. 51–56. <https://doi.org/10.14255/2308-9628/15.111/5> [in Ukrainian].

29. Khodosovtsev, O.Ye., Boiko, M.F., Nadyeina, O.V., & Khodosovtseva, Yu.A. (2011). Lishaynykovi ta mokhovi uhruppovannia nyzhnodniprovs'kykh aren: syntaksonomiia ta indykatsiia deflyatsiinykh protsesiv [Lichen and bryophyte associations on the lower Dnieper sand dunes: syntaxonomy and weathering indication]. *Chornomors'k Botanical Journal*, 7(1), pp. 44–66. [in Ukrainian].

30. Senanayake, I.C., Rathnayaka, A.R., Marasinghe, D.S., Calabon, M.S., Gentekaki, E., Lee, H.B., et al. (2020). Morphological approaches in studying fungi: collection, examination, isolation, sporulation and preservation. *Mycosphere*, 11(1), pp. 2678–2754. <https://doi.org/10.5943/mycosphere/11/1/20>

31. Matushkina, N.B. (2020). Babky (Odonata) Tsentral'noi Ukrainy: Pol'ovyi atlas-vyznachnyk naipo-shyrenishykh vydiv [Odonata of Central Ukraine : Field atlas-guide of the most common species]. Kyiv: Talkom, 104 p. [in Ukrainian].

32. Nekrutenko, Yu., & Chikolovets, V. (2005). Denni metelyky Ukrainy (seriia "Pryroda Ukrainy") [Day-flying butterflies of Ukraine (series "Nature of Ukraine")]. Kyiv : Raievskiy Publishing. [in Ukrainian].

33. iNaturalist (2025). iNaturalist – Community Science Platform. URL: <https://www.inaturalist.org> (дата звернення: 13.08.2025).

34. GBIF (2025). Global Biodiversity Information Facility – International Open Data Infrastructure. URL: <https://www.gbif.org> (дата звернення: 20.08.2025).

35. Dudka, I.O., Smitska, M.F., Smyk, L.V., & Merezko, T.O. (1976). Deyaki teoretychni pytannia mikotsenolohii. 1. Mikotsenoz i mikosynuziia [Some theoretical issues of mycocenology. 1. Mycocenosis and mycosynusia]. *Ukrainian Botanical Journal*, 33(1), pp. 12–20. [in Ukrainian].

36. Dudka, I.O., Tykhonenko, Yu.Ya., & Burdyukova, L.I. (1990). Herbofil'ni ta filofil'ni mikosynuzii parazytnoho mikromitsetiv v URSS [Herbophilous and philophilous mycosynusia of parasitic micromycetes in the USSR]. *Ukrainian Botanical Journal*, 47(4), pp. 5–9. [in Ukrainian].

37. Sliusarienko, O.M., Kryvytska, T.M., Yermolaieva, O.Yu., & Nemertsalova, S.V. (2006). Mikotsenoz filosfery shpylnkovykh i zlakiv u botanichnomu sadu ONU im. I.I. Mechnikova [Mycocenosis of the phyllosphere of pines and grasses in the botanical garden of ONU named after I.I. Mechnikov]. *Odesa National University Herald. Biology*, 11(6), pp. 129–134. [in Ukrainian].

38. Hyde, K.D., Noorabadi, M.T., Thiagaraja, V., He, M.Q., et al. (2024). The 2024 Outline of Fungi and fungi-like taxa. *Mycosphere*, 15(1), pp. 5146–6239. <https://doi.org/10.5943/mycosphere/15/1/25>

39. Lytvynenko, Yu.I., & Hayova, V.P. (2018). New and noteworthy records of coprophilous species of *Coniochaeta* and *Sordaria* (Sordariomycetes, Ascomycota) from Ukraine. *Ukrainian Botanical Journal*, 75(6), pp. 538–551. <https://doi.org/10.15407/ukrbotj75.06.538>

40. Lytvynenko, Yu.I., Hayova, V.P., Akulov, O.Yu., Dzhagan, V.V., & Romanova, D.A. (2022). An update on the occurrence of the Sporormiaceae (Pleosporales) in Ukraine. *Czech Mycology*, 74(2), pp. 195–226. <https://doi.org/10.33585/cmy.74206>

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 23.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025

ВПЛИВ ВТОРИННИХ МЕТАБОЛІТІВ МІКРОМІЦЕТІВ НА ЛІПІДНИЙ ПРОФІЛЬ КОРОПОВИХ РИБ

Лукаш Олександр Васильович,

доктор біологічних наук, професор,
професор кафедри екології, географії та природокористування
Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2702-6430>
Scopus Author ID: 57202369398
Web of Science Researcher ID: AAF-8129-2021

Ткачук Наталія Василівна,

кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри біології
Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5115-7716>
Scopus Author ID: 7801574248
Web of Science Researcher ID: AAB-4448-2020

Янченко Віктор Олексійович,

кандидат фармацевтичних наук, доцент,
доцент кафедри хімії, технологій та фармації
Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6727-4124>
Scopus Author ID: 6602531355
Web of Science Researcher ID: AAC-9900-2020

Проблема забруднення водних екосистем, зокрема антропогенними полутантами та ксенобіотиками, є однією з найактуальніших у сучасному рибництві. Особливу загрозу для здоров'я гідробіонтів становлять вторинні метаболіти мікроміцетів, відомі як мікотоксини, які можуть потрапляти у водойми через контаміновані корми та інші джерела. Ці сполуки здатні накопичуватися в організмі риб та викликати суттєві порушення їх фізіологічних та біохімічних функцій. Встановлено, що однією з найбільш чутливих до токсичного впливу систем є ліпідний обмін, який відіграє ключову роль в енергозабезпеченні та структурній організації клітин. У зв'язку з цим, дослідження впливу мікотоксинів на ліпідний профіль та процеси перекисного окиснення ліпідів у риб є важливим завданням для розуміння механізмів токсикофу та розробки заходів із захисту здоров'я водних організмів.

Метою даної роботи було дослідження змін ліпідного профілю та інтенсивності процесів перекисного окиснення ліпідів у тканинах коропових риб, що зазнали впливу мікотоксину T2. Методи дослідження. Експеримент проводили протягом 14 діб, використовуючи чотири групи риб: контрольну (без токсину) та три експериментальні з різними концентраціями мікотоксину T2 у воді (1,0 мкг/л, 2,0 мкг/л та 5,0 мкг/л). Для біохімічних аналізів відбирали проби тканин печінки та білих скелетних м'язів. Визначали вміст загальних ліпідів та їх фракцій (тригліцериди, фосфоліпіди, холестерин). Інтенсивність ПОЛ оцінювали за рівнем малонового діальдегіду (МДА) та вмістом дієнових кон'югатів. Додатково аналізували активність ферментів антиоксидантного захисту (супероксиддисмутаза, каталаза, глутатіонпероксидаза) та ключового ферменту ліпідного обміну – ліпази.

Результати. Дослідження показали, що вплив мікотоксину T2 спричиняє значні порушення ліпідного метаболізму, які мали виражений дозозалежний характер. Встановлено достовірне збільшення вмісту загальних ліпідів та їх тригліцеридної фракції у тканинах печінки у всіх експериментальних групах, що свідчить про розвиток жирової дистрофії. Одночасно спостерігалось інтенсивне зростання рівня МДА та дієнових кон'югатів, особливо у печінці, що вказує на посилення процесів ПОЛ і масове пошкодження клітинних мембран. Реакція антиоксидантної системи мала двофазний характер: при низькій концентрації токсину активність ферментів зростала як компенсаторна реакція, тоді як при високих дозах відзначалося її пригнічення, що вказувало на виснаження захисних механізмів. Крім того, було зафіксовано суттєве зниження активності ліпази, що пояснює механізм накопичення тригліцеридів у тканинах.

Висновки. Отримані результати підтверджують, що мікотоксин T2 є потужним індуктором оксидативного стресу та призводить до глибоких порушень ліпідного обміну у коропових риб. Ці дані є важливими для оцінки екологічних ризиків, пов'язаних із забрудненням водних ресурсів, та мають практичне значення для розробки стратегій захисту гідробіонтів у аквакультурі.

Ключові слова: короп, вторинні метаболіти мікроміцетів, T2-токсин, ліпідний обмін, перекисне окиснення ліпідів, оксидативний стрес, полутанти, склад ліпідів, ліпаза.

Lukash Oleksandr, Tkachuk Nataliia, Yanchenko Viktor. Influence of secondary metabolites of micromycetes on the lipid profile of curly fish

The problem of pollution of aquatic ecosystems, in particular by anthropogenic pollutants and xenobiotics, is one of the most urgent in modern fish farming. A particular threat to the health of aquatic organisms is posed by secondary metabolites of micromycetes, known as mycotoxins, which can enter water bodies through contaminated feed and other sources. These compounds are able to accumulate in the body of fish and cause significant disruptions in their physiological and biochemical functions. It has been established that one of the most sensitive systems to toxic effects is lipid metabolism, which plays a key role in energy supply and structural organization of cells. In this regard, the study of the influence of mycotoxins on the lipid profile and lipid peroxidation processes in fish is an important task for understanding the mechanisms of toxicosis and developing measures to protect the health of aquatic organisms.

The aim of this work was to study the effect of mycotoxin T2 on key indicators of lipid metabolism, the intensity of lipid peroxidation (LPO) and the state of antioxidant protection in carp (*Cyprinus carpio* L.). Research methods. The experiment was conducted for 14 days, using four groups of fish: a control group (without toxin) and three experimental groups with different concentrations of mycotoxin T2 in water (1.0 µg/l, 2.0 µg/l and 5.0 µg/l). Samples of liver and white skeletal muscle tissues were taken for biochemical analyses. The content of total lipids and their fractions (triglycerides, phospholipids, cholesterol) was determined. The intensity of LPO was assessed by the level of malondialdehyde (MDA) and the content of diene conjugates. Additionally, the activity of antioxidant defense enzymes (superoxide dismutase, catalase, glutathione peroxidase) and the key enzyme of lipid metabolism – lipase were analyzed.

Results. Studies have shown that the effect of mycotoxin T2 causes significant disorders of lipid metabolism, which had a pronounced dose-dependent nature. A significant increase in the content of total lipids and their triglyceride fraction in liver tissues was established in all experimental groups, which indicates the development of fatty dystrophy. At the same time, an intensive increase in the level of MDA and diene conjugates was observed, especially in the liver, which indicates an increase in lipid peroxidation processes and massive damage to cell membranes. The reaction of the antioxidant system had a two-phase nature: at low concentrations of the toxin, the activity of enzymes increased as a compensatory reaction, while at high doses its inhibition was noted, which indicated the depletion of protective mechanisms. In addition, a significant decrease in lipase activity was recorded, which explains the mechanism of triglyceride accumulation in tissues.

Conclusions. The results obtained confirm that mycotoxin T2 is a powerful inducer of oxidative stress and leads to profound disturbances in lipid metabolism in cyprinid fish. These data are important for assessing the environmental risks associated with water pollution and have practical significance for developing strategies for protecting aquatic organisms in aquaculture.

Key words: carp, secondary metabolites of micromycetes, T2-toxin, lipid metabolism, lipid peroxidation, oxidative stress, pollutants, lipid composition, lipase.

Вступ. Проблема забруднення навколишнього середовища, зумовлена антропогенною діяльністю, є однією з найактуальніших глобальних загроз [1; 2]. Водні екосистеми, зокрема ті, що використовуються для розведення риб, постійно зазнають впливу різноманітних полутантів, що призводить до порушення фізіологічних та біохімічних процесів у гідробіонтів [3; 4].

Одними з небезпечних контамінантів, що потрапляють у водойми, є ксенобіотики та вторинні метаболіти мікроміцетів, зокрема мікотоксини, які можуть накопичуватися в організмі риб через контаміновані корми або воду [5; 6]. Використання рослинної сировини у кормах для аквакультурних тварин значно зросло. Водночас це підвищило ризик контамінації (забруднення) кормів мікотоксинами, які продукуються мікроміцетами, зокрема роду *Aspergillus*, *Fusarium* та *Penicillium*. Згідно з глобальними дослідженнями, проведеним у 2025 році, найбільш поширеними контамінантами в кормах для риб є фумонізени, дезоксиніваленол (ДОН), зеараленон (ZEN) та афлатоксин В1 (AFB1). Мікотоксини майже повсюдно присутні в комбінованих кормах, і понад 90% зразків забруднені принаймні одним мікотоксином, оскільки рослинні інгредієнти все частіше використовуються у кормах для аквакультурних тварин, і вони схильні до забруднення мікотоксинами, оскільки мікотоксигенні гриби вражають сільськогосподарські культури як у полі, так і під час зберігання [7]. Цей вплив зумовлює каскад патофізіологічних змін, що відображаються на стані важливих метаболічних систем організму.

Ліпідний обмін є одним з найбільш чутливих до токсичного впливу [8; 9]. Ліпіди не лише виконують

функцію основного енергетичного резерву, але й є ключовими компонентами клітинних мембран, забезпечуючи їхню структурну цілісність та функціональність [10]. Одним з основних наслідків токсичного ураження є посилення процесів перекисного окиснення ліпідів (ПОЛ), що призводить до руйнування біологічних мембран, генерації вільних радикалів та розвитку оксидативного стресу [11; 12]. Здатність гідробіонтів протистояти цьому процесу залежить від стану їхньої антиоксидантної системи [13; 14].

Незважаючи на значний обсяг досліджень, присвячених впливу окремих ксенобіотиків на організм риб, питання комплексного вивчення змін ліпідного профілю, інтенсивності перекисного окиснення та діяльності ферментів ліпідного обміну під дією вторинних метаболітів мікроміцетів залишається актуальним [15; 16]. Вивчення цих процесів є критично важливим для розуміння механізмів адаптації та ураження коропових риб в умовах сучасного антропогенного навантаження, а також для розробки методів захисту їх здоров'я у рибництві.

Метою даної роботи є дослідження змін ліпідного профілю та інтенсивності процесів перекисного окиснення ліпідів у тканинах коропових риб, що зазнали впливу мікотоксину T2.

Матеріали та методи. Дослідження впливу мікотоксину проведено на дворічках коропа (*Cyprinus carpio* L.), вирощених у ВАТ «Чернігіврибгосп» з 2023 по 2024 р. Гідрохімічний режим ставків, з яких відбиралася риба, та експериментальні умови у 200-літрових акваріумах не відхилялися від рибоводно-біологічних та гід-

рохімічних норм. Розмір рН становив $7,30 \pm 0,27$; вміст кисню – $5,6 \pm 0,4$ мг/дм³, температура води відповідала природній. Маса риби коливалася у межах 200-300 р. Для проведення експерименту було взято 3 різні концентрації мікотоксину Т2. Використовували стандартний зразок Т-2 токсину TRILOGY (лот 231205-24145), до 05.2025, умови зберігання згідно паспорту на стандарт при температурі не вище 8^oС. Для проведення експерименту було сформовано чотири групи риб: одна контрольна (без додавання мікотоксину) та три експериментальні, яким у воду впродовж 14 діб додавали мікотоксин Т2 у різних концентраціях: 1,0 мкг/л, 2,0 мкг/л та 5,0 мкг/л. Кожна група складалася з 5 риб. Риб утримували за однакових умов. Після закінчення експерименту рибу вилучали та проводили еваназію методом декапітації згідно з етичними принципами поводження з тваринами [17]. Для аналізу відбирали проби тканин печінки та скелетних м'язів. Вміст загальних ліпідів у тканинах риб визначали загальноприйнятим екстракційно-ваговим методом. Розділення ліпідів на окремі фракції (тригліцериди, фосфоліпіди, холестерин) проводили методом тонкошарової хроматографії на пластинках Silicagel. Процеси ПОЛ оцінювали за рівнем вмісту кінцевих продуктів – малонового діальдегіду (МДА), який визначали за реакцією з тіобарбітуровою кислотою (ТБК), як показано в роботах [11, 12]. Інтенсивність ПОЛ також оцінювали за вмістом проміжних продуктів – дієнових кон'югатів. Для оцінки стану антиоксидантного захисту вимірювали активність ферментів: супероксиддисмутази (СОД), каталази (КАТ) та глутатіонпероксидази (ГП) за загальноприйнятими спектрофотометричними методами. Визначення активності глутатіонредуктази засноване на вимірюванні швидкості окислення NADPH, реєстрували спектрофотометрично по зменшенню оптичної густини при довжині хвилі 340 нм [18]. Активність каталази визначали згідно методичних рекомендацій [19]. Визначення активності СОД здійснювали згідно [20] у модифікації [21].

Активність ліпази визначали спектрофотометричним методом. Вміст загального білка в гомогенатах тканин, необхідний для розрахунку питомої активності ферментів, визначали методом Лоурі [22].

Отримані результати обробляли статистично за допомогою програми Statistica 10.0 (StatSoft, США). Для порівняння середніх значень експериментальних і контрольної груп використовували однофакторний

дисперсійний аналіз з подальшим застосуванням критерію Стьюдента. Відмінності вважали статистично значущими при $p < 0,05$.

Результати. Отримані результати свідчать про виражений токсичний вплив мікотоксину Т2 на біохімічні показники коропових риб. Зміни мали дозозалежний характер і найбільш інтенсивно проявлялися у печінці, що підтверджує її роль як головного детоксикаційного органу. Як видно з таблиці 1, у піддослідних риб спостерігалось достовірне зростання вмісту загальних ліпідів у печінці у всіх експериментальних групах. При максимальній концентрації токсину (5,0 мкг/л) цей показник збільшився майже на 60 % порівняно з контролем. Ці зміни супроводжувалися значним, дозозалежним збільшенням частки тригліцеридів та холестерину. Водночас, частка фосфоліпідів у печінці, що є критично важливими для цілісності клітинних мембран, мала тенденцію до зниження. У м'язовій тканині зміни були менш вираженими, проте також відзначалося статистично значуще зростання вмісту загальних ліпідів у групах, що перебували за концентрацій 2,0 мкг/л та 5,0 мкг/л.

Таке накопичення ліпідів у печінці свідчить про порушення її функціонального стану. Це може бути пов'язано з інгібуванням синтезу ліпопротеїнів, що відповідають за транспорт жирів з печінки в інші тканини, або зі зміною активності ключових ферментів ліпідного обміну.

Результати, наведені у таблиці 2, підтверджують, що мікотоксин Т2 є потужним індуктором окисидативного стресу. Вміст МДА та дієнових кон'югатів у печінці риб зростав пропорційно збільшенню концентрації токсину, що свідчить про посилення процесів ПОЛ і масове пошкодження біологічних мембран. У м'язах інтенсивність ПОЛ також зростала, хоча й менш виражено.

Вміст МДА у печінці, що є маркером кінцевих продуктів ПОЛ, у групі з найвищою концентрацією токсину зріс у понад два з половиною рази порівняно з контролем. У м'язах також спостерігалось суттєве зростання рівня МДА, хоча й менш виражене. Це свідчить про інтенсивне руйнування клітинних мембран під впливом токсину. Рівень дієнових кон'югатів, які є проміжними продуктами ПОЛ, зростав пропорційно до концентрації токсину як у печінці, так і в м'язах. Це підтверджує, що процес окиснення ліпідів починається на ранніх стадіях і посилюється зі зростанням токсичного навантаження. У печінці їхній вміст збільшився більш ніж удвічі.

Таблиця 1

Показники ліпідного профілю в тканинах коропа за дії мікотоксину Т2 (M±m, n=5)

Показник	Тканина	Концентрація Т2, мкг/л			
		0,0	1,0	2,0	5,0
Загальні ліпіди, %	Печінка	10,2 ± 0,5	11,5 ± 0,5*	13,8 ± 0,6*	16,1 ± 0,7*
	М'язи	2,8 ± 0,1	2,9 ± 0,1	3,1 ± 0,2*	3,3 ± 0,2*
Тригліцериди, %	Печінка	44,5 ± 1,8	46,2 ± 2,1	54,5 ± 2,5*	56,1 ± 2,9*
Фосфоліпіди, %	Печінка	31,1 ± 1,5	32,8 ± 1,4	30,5 ± 1,3*	28,9 ± 1,2*
Холестерин, %	Печінка	17,4 ± 0,9	18,5 ± 1,0	21,3 ± 1,1*	22,5 ± 1,2*

Примітка: достовірність різниць порівняно з контролем: * $p < 0,05$

Показники перекисного окиснення ліпідів (ПОЛ), антиоксидантного захисту та активності ліпази в тканинах коропа (M±m, n=5)

Показник	Тканина	Концентрація Т2, мкг/л			
		0,0	1,0	2,0	5,0
МДА, нмоль/мг білка	Печінка	1,85 ± 0,12	2,40 ± 0,15*	3,80 ± 0,21*	5,10 ± 0,25*
	М'язи	0,90 ± 0,06	1,15 ± 0,08*	1,50 ± 0,10*	1,85 ± 0,11*
Дієнові кон'югати	Печінка	0,250 ± 0,01	0,315 ± 0,018*	0,450 ± 0,024*	0,580 ± 0,029*
	М'язи	0,120 ± 0,01	0,145 ± 0,009*	0,180 ± 0,011*	0,215 ± 0,013*
СОД, Од/мг білка	Печінка	1,55 ± 0,09	1,80 ± 0,11*	1,70 ± 0,10	1,40 ± 0,08*
КАТ, мкмоль/хв·мг білка	Печінка	3,20 ± 0,15	3,85 ± 0,18*	3,40 ± 0,16	2,90 ± 0,14*
ГП, нмоль/хв·мг білка	Печінка	2,10 ± 0,10	2,55 ± 0,12*	2,30 ± 0,11	1,95 ± 0,09
Активність ліпази, Од/мг білка	Печінка	0,65 ± 0,03	0,55 ± 0,03*	0,40 ± 0,02*	0,25 ± 0,01*
	М'язи	0,40 ± 0,02	0,35 ± 0,02*	0,28 ± 0,01*	0,20 ± 0,01*

Примітка: Достовірність різниць порівняно з контролем: * $p < 0,05$

Супероксиддисмутаза – у печінці активність цього ключового антиоксидантного ферменту спочатку зростала в умовах низького стресу, демонструючи адаптивну реакцію організму. Однак у групах з високими концентраціями токсину активність СОД поверталася до базового рівня, що вказує на виснаження захисної системи. Активність каталази в печінці демонструвала схожу двофазну динаміку: спочатку спостерігалось незначне зростання, а потім пригнічення. Це підтверджує, що при надмірному токсичному навантаженні здатність організму нейтралізувати вільні радикали значно зменшується. Активність ГП, що відіграє важливу роль у захисті від перекисів, також підвищувалася в умовах помірному стресу. Однак при подальшому зростанні концентрації токсину її активність знижувалася, що вказує на деградацію захисних механізмів. Було виявлено значне, дозозалежне зниження активності ліпази як у печінці, так і в м'язах риб. У групі з найвищою концентрацією токсину активність ферменту знизилася більш ніж удвічі порівняно з контролем. Це підтверджує, що мікотоксин Т2 безпосередньо впливає на метаболічні процеси, уповільнюючи розщеплення ліпідів.

Таким чином, реакція антиоксидантної системи мала двофазний характер. При низькій концентрації токсину 1,0 мкг/л активність СОД, КАТ та ГП у печінці зростала, що відображає адаптивну відповідь організму на помірний стрес. Однак при високих концентраціях (2,0 мкг/л, 5,0 мкг/л) активність цих ферментів достовірно знижувалася, що вказує на виснаження захисних механізмів і нездатність організму ефективно протистояти зростаючому оксидативному навантаженню.

Отримані нами результати узгоджуються з даними інших досліджень, які також відзначають негативний вплив мікотоксинів на ліпідний обмін у риб [23]. Зокрема, дослідження на гібридному групі показали, що афлатоксин В1 порушує метаболізм ліпідів та спричиняє їх накопичення у печінці, що призводить до ліпідного дисбалансу та окислювального стресу [24].

Також встановлено, що деякі мікотоксини, зокрема фумонізину у комбінації з дезоксиніваленолом, можуть чинити синергетичний ефект, посилюючи патологічний вплив на організм риб [25].

Важливим підтвердженням порушення ліпідного метаболізму є зміни в активності ліпази (табл. 2). У всіх експериментальних групах спостерігалось достовірне дозозалежне зниження активності цього ферменту як у печінці, так і в м'язах. Це безпосередньо пояснює накопичення тригліцеридів у тканинах, оскільки ліпаза відповідає за їх гідроліз. Враховуючи виявлені порушення ліпідного профілю, актуальним напрямом досліджень є розробка стратегій для пом'якшення негативних наслідків впливу мікотоксинів. Одним із ефективних підходів є використання кормових добавок-адсорбентів, зокрема мікотоксинових зв'язувачів (MTBs). Дослідження показали, що використання таких добавок сприяє зв'язуванню токсинів у шлунково-кишковому тракті риб, зменшуючи їх біодоступність та мінімізуючи негативний вплив [26]. Застосування, наприклад, цеоліту як добавки до корму тілапії нільської, сприяло покращенню активності антиоксидантних ферментів та загального здоров'я риб [25]. Отримані результати є важливими для оцінки екологічних ризиків, пов'язаних із забрудненням водних ресурсів, та мають практичне значення для розробки стратегій захисту гідробіонтів у аквакультури.

Висновки. Аналіз отриманих даних дозволяє зробити висновок, що вторинні метаболіти мікроміцетів, зокрема мікотоксин Т2, мають виражений негативний вплив на ліпідний обмін коропових риб. Цей вплив проявляється через інтенсифікацію процесів перекисного окиснення ліпідів, виснаження антиоксидантного захисту та інгібування активності ключових ферментів ліпідного обміну. Отримані результати підкреслюють необхідність подальшого вивчення механізмів дії поллютантів і є важливими для розробки заходів із захисту здоров'я гідробіонтів у риборівництві.

Література:

1. Грубінко В.В. Інтегральна оцінка токсичного ураження у біологічних системах. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка*. Серія: Біологія. 2005. № 3. С. 111–114.

2. Ніколаєнко Т., Іващенко М., Іващенко Н., Мехед О. Адаптивні зміни показників крові коропа лускатого (*Suaprinus carpio* Linnaeus, 1758) як відповідь на забруднення води. *Природні ресурси прикордонних територій в умовах зміни клімату*. Десна-Поліграф. 2023. С. 99-100
3. Марценюк В.М. Особливості регуляції енергозабезпечення адаптації риб до дії абіотичних та антропогенних чинників. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата біологічних наук (доктора філософії) зі спеціальності 03.00.10 «Іхтіологія». Інститут гідробіології НАН України, Київ, 2019. 225 с.
4. Мусієнко Н.Г., Жиденко А.О., Мехед О.Б., Коваленко О.М. Вплив пестицидів на морфологічні показники коропа. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка*. Серія: Біологія. 2005. №3 (26). С.319-321. <https://tinyurl.com/279a3azx>
5. Желай М. В., Полотнянко Л. В., Ячна М. Г., Мехед О. Б., Третяк О. П. Вплив мікотоксину Т2 на іхтіологічні показники коропових риб. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка*. Серія: Біологія. 2023. Т. 84, №1. С. 35-40 <https://doi.org/10.25128/2078-2357.24.1.5>
6. Полотнянко Л., Мехед О. Накопичення мікотоксинів у м'язах коропа лускатого (*Suaprinus carpio* Linnaeus, 1758) при згодовуванні корму, контамінованого Т2-токсинами. *Природні ресурси прикордонних територій в умовах зміни клімату*. Чернігів : Десна-Поліграф. 2023. С. 105-106
7. Gruber-Dorninger, C., Müller, A., Rosen, R. Multi-Mycotoxin Contamination of Aquaculture Feed: A Global Survey. *Toxins*. 2025. Т. 17. № 3. С. 116. <https://doi.org/10.3390/toxins17030116>
8. Symonova, N. A., Mekhed, O. V., Kupchuk, O. Y., & Tretyak, O. P. (2018). Toxicants in the degradation of lipids in the organism of scaly carp. *Ukrainian Journal of Ecology*, 8(4), 6-10.
9. Ячна М. Г., Мехед О. Б., Третяк О. П., Яковенко Б. В. Вміст фосфоліпідів у тканинах коропа лускатого (*Suaprinus carpio* L.) за дії натрій лаурилсульфатвмісного та безфосфатного синтетичних миючих засобів. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка*. Серія: Біологія, 2019, № 2 (76). С.48-52.
10. Головачук Н. П., Тарновська А. В., Коцюмбас Г. І., Санагуський Д. І. Процеси перекисного окиснення ліпідів у живих організмах : монографія. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2012. 252 с.
11. Особа І. А. Біологічна роль перекисного окиснення ліпідів у забезпеченні функціонування організму риб. *Рибогосподарська наука України*. 2013. № 1. С. 87–96. URL: <http://www.fishukr.org.ua>
12. Хоменчук В. О., Рабченко О. О., Станіславчук А. В., Курант В. З. Вільнорадикальне перекисне окиснення ліпідів у тканинах риб за дії феруму (III). *Сучасні проблеми теоретичної та практичної іхтіології*: матеріали XI іхтіологічної науково-практичної конференції. Львів, 2018. С. 82–85.
13. Особа І. А., Грициняк І. І. Активність неферментативної ланки системи антиоксидантного захисту у печінці однорічок лускатих та рамчастих коропів несвицького зонального типу. *Рибогосподарська наука України*. 2010. № 3. С. 62–65. URL: <http://www.fishukr.org.ua>
14. Клименко О. Ю., Гассо В. Я. Інтенсивність процесів перекисного окиснення ліпідів у прудкої ящірки з екосистем різного рівня трансформації. *Біорізноманіття та роль тварин в екосистемах*: Матеріали VI Міжнародної наукової конференції. Дніпропетровськ: Вид-во ДНУ, 2011. С. 292–294.
15. Грубінко В.В. Системна оцінка метаболічних адаптацій у гідробіонтів. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка*. Серія: Біологія. 2005. № 2. С. 36–39.
16. Желай М., Ячна М., Мехед О., Третяк О. Адаптивні зміни іхтіологічних показників коропових риб за дії мікотоксину Т2. *Природні ресурси прикордонних територій в умовах зміни клімату*. Чернігів : Десна-Поліграф. 2023. С. 77-78.
17. World Medical Association. (2013). World Medical Association Declaration of Helsinki. Ethical principles for medical research involving human subjects. *JAMA*, 310(20), 2191-2194. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>
18. Левадна О. В., Донченко Г. В., Валуцина В. М. та ін. Співвідношення між величинами активності ферментів антиоксидантної системи в різних тканинах інтактних щурів. *Український біохімічний журнал*. 1998. Т. 70, № 6. С. 53–58.
19. Ou P., Wolf S. P. Erythrocyte catalase inactivation (H₂O₂ production) by ascorbic acid and glucose in presence of aminotriazole: role of transition metals and relevance to diabetes. *Biochemical Journal*. 1994. Vol. 303. P. 935–940.
20. Доценко О. І., Доценко В. А., Міщенко А. М. Активність супероксиддисмутази і каталази в еритроцитах і деяких тканинах мишей в умовах низькочастотної вібрації. *Фізика живого*. 2010. Т. 18, № 1. С. 107–113.
21. Костюк В. А., Потапович А. І., Ковальова Ж. В. Простий і чутливий метод визначення активності супероксиддисмутази, оснований на реакції окиснення кверцетину. *Питання медичної хімії*. 1990. № 2. С. 88–91.
22. Lowry, O., Rosebrough, N., Farr, A., & Randall, R. Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J. Biol. Chem.*, 1951. 193, 265–275. [https://www.jbc.org/article/S0021-9258\(19\)52451-6/pdf](https://www.jbc.org/article/S0021-9258(19)52451-6/pdf)
23. Koletsis, P., Schrama, J.W., Graat, E.A.M., Wiegertjes, G.F., Lyons, P., Pietsch, C. The Occurrence of Mycotoxins in Raw Materials and Fish Feeds in Europe and the Potential Effects of Deoxynivalenol (DON) on the Health and Growth of Farmed Fish Species—A Review. *Toxins*. 2021. Т. 13. № 6. С. 403. <https://doi.org/10.3390/toxins13060403>
24. Liu, H., Xie, R., Huang, W., Yang, Y., Zhou, M., Lu, B., Li, B., Tan, B., Dong, X. Negative effects of aflatoxin B1 (AFB1) in the diet on growth performance, protein and lipid metabolism, and liver health of juvenile hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* Epinephelus lanceolatus♂). *Aquaculture Reports*. 2023. Т. 33. С. 101779. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101779>
25. Fornari, D.C., Peixoto, S., Ksepka, S.P., Bullard, S.A., Rossi, W., Nuzback, D.E., Davis, D.A. Effects of dietary mycotoxins and mycotoxin adsorbent additives on production performance, hermatological parameters, and liver histology in juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Frontiers in Animal Science*. 2023. Т. 4. С. 1281722. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1281722>

26. Phudkliang, J., Soonthornchai, W., Maele, L.V., Xu, H., Qi, Z., Lee, P.-T., Chantiratikul, A., Wangkahart, E. Studies on the use of mycotoxin binders as an effective strategy to mitigate mycotoxin contamination in aquafeed: A case study in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture Reports*. 2025. T. 43. C. 102984. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2025.102984>

References:

1. Hrubinko, V.V. (2005). Integralna otsinka toksychnoho urazhennia u biolohichnykh systemakh [Integral assessment of toxic damage in biological systems]. *Naukovi zapysky Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: Biolohiia*, (3), 111–114. [in Ukrainian].
2. Nikolaienko, T., Ivashchenko, M., Ivashchenko, N., & Mekhed, O. (2023). Adaptivni zminy pokaznykiv krovi koropa luskatoho (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) yak vidpovid na zabrudnennia vody [Adaptive changes in blood indicators of scaly carp (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) in response to water pollution]. *Pryrodni resursy prykordonnykh terytorii v umovakh zminy klimatu* (pp. 99–100). Chernihiv: Desna-Polihraf. [in Ukrainian].
3. Martseniuk, V.M. (2019). *Osoblyvosti rehuliasii enerhozabezpechennia adaptatsii ryb do dii abiotychnykh ta antropohennykh chynnykiv* [Features of regulation of energy supply for the adaptation of fish to the influence of abiotic and anthropogenic factors] (PhD dissertation). Instytut hidrobiolohii NAN Ukrainy, Kyiv, 225 p. [in Ukrainian].
4. Musiienko, N.H., Zhydenko, A.O., Mekhed, O.B., & Kovalenko, O.M. (2005). Vplyv pestytsydiv na morfolohichni pokaznyky koropa [Impact of pesticides on morphological indicators of carp]. *Naukovi zapysky Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: Biolohiia*, 3(26), 319–321. <https://tinyurl.com/279a3azx> [in Ukrainian].
5. Zhelai, M. V., Polotnianko, L. V., Yachna, M. H., Mekhed, O. B., & Tretiak, O. P. (2023). Vplyv mikotoksynu T2 na ikhtiologichni pokaznyky koropovykh ryb [Impact of T-2 mycotoxin on ichthyological indicators of carp fish]. *Naukovi zapysky Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: Biolohiia*, 84(1), 35–40. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.24.1.5> [in Ukrainian].
6. Polotnianko, L., & Mekhed, O. (2023). Nakopychennia mikotoksyniv u m'iazakh koropa luskatoho (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) pry zhodovuvanni kormu, kontaminovanoho T2-toksynom [Accumulation of mycotoxins in the muscles of scaly carp (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) when fed T2-toxin-contaminated feed]. *Pryrodni resursy prykordonnykh terytorii v umovakh zminy klimatu* (pp. 105–106). Chernihiv: Desna-Polihraf. [in Ukrainian].
7. Gruber-Dorninger, C., Müller, A., & Rosen, R. (2025). Multi-Mycotoxin Contamination of Aquaculture Feed: A Global Survey. *Toxins*, 17(3), 116. <https://doi.org/10.3390/toxins17030116>
8. Symonova, N. A., Mekhed, O. B., Kupchuk, O. Y., & Tretiak, O. P. (2018). Toxicants in the degradation of lipids in the organism of scaly carp. *Ukrainian Journal of Ecology*, 8(4), 6-10.
9. Yachna, M. H., Mekhed, O. B., Tretiak, O. P., & Yakovenko, B. V. (2019). Vmist fosfolipidiv u tkanynakh koropa luskatoho (*Cyprinus carpio* L.) za dii natrii laurylsulfatvmisnoho ta bezfosfatnoho syntetychnykh myiuchykh zasobiv [Phospholipid content in tissues of scaly carp (*Cyprinus carpio* L.) under the influence of sodium lauryl sulfate-containing and phosphate-free synthetic detergents]. *Naukovi zapysky Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: Biolohiia*, 2(76), 48-52. [in Ukrainian].
10. Holovchak, N. P., Tarnovska, A. V., Kotsiumbas, H. I., & Sanahuskyi, D. I. (2012). *Protsesy perekysnoho okysnennia lipidiv u zhyvykh orhanizmach: monohrafiia* [Lipid peroxidation processes in living organisms: monograph]. Lviv: LNU imeni Ivana Franka, 252 p. [in Ukrainian].
11. Osoba, I. A. (2013). Biolohichna rol perekysnoho okysnennia lipidiv u zabezpechenni funktsionuvannia orhanizmu ryb [Biological role of lipid peroxidation in ensuring the functioning of fish organisms]. *Rybospodarska nauka Ukrainy*, (1), 87–96. <http://www.fishukr.org.ua> [in Ukrainian].
12. Khomenchuk, V. O., Rabcheniuk, O. O., Stanislavchuk, A. V., & Kurant, V. Z. (2018). Vilnoradykalne perekysne okysnennia lipidiv u tkanynakh ryb za dii ferumu (III) [Free radical lipid peroxidation in fish tissues under the action of ferum (III)]. *Suchasni problemy teoretychnoi ta praktychnoi ikhtiologii: materialy XI ikhtiologichnoi nauko-vo-praktychnoi konferentsii* (pp. 82–85). Lviv. [in Ukrainian].
13. Osoba, I. A., & Hrytsyniak, I. I. (2010). Aktyvnist nefermentatyvnoi lanky systemy antyoksydantnoho zakhystu u pechintsi odnorichok luskatykh ta ramchastykh koropiv nesvytskoho zonalnoho typu [Activity of the non-enzymatic link of the antioxidant defense system in the liver of one-year-old scaly and mirror carp of Nesvytskyi zonal type]. *Rybospodarska nauka Ukrainy*, (3), 62–65. <http://www.fishukr.org.ua> [in Ukrainian].
14. Klymenko, O. Yu., & Hasso, V. Ya. (2011). Intensyvni protsesiv perekysnoho okyslennia lipidiv u prudkoi yashchirky z ekosystem riznoho rivnia transformatsii [Intensity of lipid peroxidation processes in the sand lizard from ecosystems with different levels of transformation]. *Bioriznomanittia ta rol tvaryn v ekosystemakh: Materialy VI Mizhnarodnoi nauko-voi konferentsii* (pp. 292–294). Dnipropetrovsk: Vyd-vo DNU. [in Ukrainian].
15. Hrubinko, V.V. (2005). Systemna otsinka metabolichnykh adaptatsii u hidrobiontiv [Systemic assessment of metabolic adaptations in hydrobionts]. *Naukovi zapysky Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: Biolohiia*, (2), 36–39. [in Ukrainian].
16. Zhelai, M., Yachna, M., Mekhed, O., & Tretiak, O. (2023). Adaptivni zminy ikhtiologichnykh pokaznykiv koropovykh ryb za dii mikotoksynu T2 [Adaptive changes in ichthyological indicators of carp fish under the influence of T-2 mycotoxin]. *Pryrodni resursy prykordonnykh terytorii v umovakh zminy klimatu* (pp. 77–78). Chernihiv: Desna-Polihraf. [in Ukrainian].
17. World Medical Association. (2013). World Medical Association Declaration of Helsinki. Ethical principles for medical research involving human subjects. *JAMA*, 310(20), 2191-2194. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>

18. Levadna, O.V., Donchenko, H.V., Valutsyna, V.M., et al. (1998). Spivvidnoshennia mizh velychynamy aktyvnosti fermentiv antyoksydantnoi systemy v riznykh tkanykh intaktykh shchuriv [Relationship between the activity of antioxidant system enzymes in different tissues of intact rats]. *Ukrainskyi biokhimichnyi zhurnal*, 70(6), 53–58. [in Ukrainian].
19. Ou, P., & Wolf, S.P. (1994). Erythrocyte catalase inactivation (H₂O₂ production) by ascorbic acid and glucose in presence of aminotriazole: role of transition metals and relevance to diabetes. *Biochemical Journal*, 303, 935–940.
20. Kostyuk, V.A., Potapovych, A.I., & Kovaleva, Zh.V. (1990). Prostyi i chutlyvyi metod vyznachennia aktyvnosti superoksyd dysmutazy, osnovanyi na reaktsii okysnennia kvvertsetynu [A simple and sensitive method for determination of superoxide dismutase activity based on quercetin oxidation reaction]. *Pytannia medychnoi khimii*, (2), 88–91. [in Ukrainian].
21. Dotsenko, O.I., Dotsenko, V.A., & Mishchenko, A.M. (2010). Aktyvnist superoksyd dysmutazy i katalazy v erytrotsyakh i deiaktykh tkanykh myshei v umovakh nyzkochastotnoi vibratsii [Activity of superoxide dismutase and catalase in erythrocytes and some tissues of mice under low-frequency vibration]. *Fizyka zhyvoho*, 18(1), 107–113. [in Ukrainian].
22. Lowry, O., Rosebrough, N., Farr, A., & Randall, R. (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J. Biol. Chem.*, 193, 265–275. [https://www.jbc.org/article/S0021-9258\(19\)52451-6/pdf](https://www.jbc.org/article/S0021-9258(19)52451-6/pdf)
23. Koletsy, P., Schrama, J.W., Graat, E.A.M., Wiegertjes, G.F., Lyons, P., & Pietsch, C. (2021). The Occurrence of Mycotoxins in Raw Materials and Fish Feeds in Europe and the Potential Effects of Deoxynivalenol (DON) on the Health and Growth of Farmed Fish Species—A Review. *Toxins*, 13(6), 403. <https://doi.org/10.3390/toxins13060403>
24. Liu, H., Xie, R., Huang, W., Yang, Y., Zhou, M., Lu, B., Li, B., Tan, B., & Dong, X. (2023). Negative effects of aflatoxin B1 (AFB1) in the diet on growth performance, protein and lipid metabolism, and liver health of juvenile hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* *Epinephelus lanceolatus*). *Aquaculture Reports*, 33, 101779. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101779>
25. Fornari, D.C., Peixoto, S., Ksepka, S.P., Bullard, S.A., Rossi, W., Nuzback, D.E., & Davis, D.A. (2023). Effects of dietary mycotoxins and mycotoxin adsorbent additives on production performance, hematological parameters, and liver histology in juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Frontiers in Animal Science*, 4, 1281722. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1281722>
26. Phudkliang, J., Soonthornchai, W., Maele, L.V., Xu, H., Qi, Z., Lee, P.-T., Chantiratikul, A., & Wangkahart, E. (2025). Studies on the use of mycotoxin binders as an effective strategy to mitigate mycotoxin contamination in aqua-feed: A case study in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture Reports*, 43, 102984. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2025.102984>

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 26.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025

ОЦІНКА ПРОМИСЛОВИХ ЗАПАСІВ І ПРОГНОЗ ВИЛОВУ РИБ РОДИНИ ОКУНЕВІ (PERCIDAE) ДНІПРОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА НА 2026 РІК

Маренков Олег Миколайович,

кандидат біологічних наук, доцент,
проректор з наукової роботи Дніпровського
національного університету імені Олеся Гончара
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3456-2496>
Scopus Author ID: 57817527700
Web of Science Researcher ID: M-9263-2019

Нестеренко Олег Станіславович,

доктор філософії в галузі біології, старший дослідник,
старший науковий співробітник Науково-дослідної
лабораторії гідробіології іхтіології та радіобіології
Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7407-7911>
Scopus Author ID: 57686637000
Web of Science Researcher ID: U-5190-2017

Боровик Іван Ігорович,

доктор філософії в галузі біології, молодший науковий
співробітник Науково-дослідної лабораторії
гідробіології іхтіології та радіобіології
Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8106-1080>
Scopus Author ID: 60000849900

Гамолін Андрій Володимирович,

аспірант кафедри загальної біології та водних
біоресурсів
Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6831-4696>

У статті наведено результати комплексної оцінки стану промислових популяцій трьох видів риб родини Окуневі (судака звичайного *Sander lucioperca* (Linnaeus, 1758), окуня звичайного *Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758 та йоржа звичайного *Gymnoscephalus cernua* (Linnaeus, 1758)) за матеріалами із Дніпровського водосховища на основі даних промислових і контрольних ловів, біологічного аналізу особин та статистики вилову за останні 10 років.

Актуальність роботи зумовлена зміною гідроекологічних умов та скороченням площі рибогосподарських водойм України унаслідок повномасштабної війни, яка вже спричинила втрату Каховського водосховища та обмеження рибальства у прифронтових регіонах, у басейні Чорного та Азовського морів. На фоні цих подій Дніпровське водосховище набуває стратегічного рибогосподарського значення.

Методи дослідження включали контрольні та промислові лови у 2024–2025 рр. на трьох ділянках Дніпровського водосховища, біологічний аналіз риб, визначення вікової структури, коефіцієнтів згодованості, чисельності цьоголіток, а також аналіз багаторічних іхтіологічних даних. Розраховано коефіцієнти природної смертності риб, промислове зусилля, величини промислового запасу та потенційні обсяги допустимого вилову.

Проаналізовано сучасну динаміку чисельності та вікової структури популяцій окуневих видів риб, визначено лінійно-вагові показники і проведено оцінку фізіологічного стану риб. На підставі визначених біологічних і промислових параметрів спрогнозовано обсяги допустимого вилову на 2026 рік: для судака – 47,5 т; окуня – 67,5 т; для йоржа – 0,11 т. Виявлено локальні прояви тугорослості у риб із Самарської затоки, що обґрунтовує необхідність адаптивного управління рибальством на акваторії затоки.

Ключові слова: Дніпровське водосховище, промислові риби, судак, окунь, йорж, рибний промисел, прогноз, біомеліорація.

Marenkov Oleh, Nesterenko Oleh, Borovyk Ivan, Gamolin Andriy. Assessment of commercial stocks and forecast of catches of fish of the family Percidae of the Dniprovsk Reservoir for 2026

The article presents the results of a comprehensive assessment of the state of commercial populations of three species of fish of the family Percidae (pikeperch *Sander lucioperca* (Linnaeus, 1758), European perch *Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758, and ruff

Gymnocephalus cernua (Linnaeus, 1758)) of the Dniprovsk Reservoir based on data from commercial and control catches, biological analysis of individuals, and catch statistics over the last 10 years.

The relevance of the work is due to the change in hydroecological conditions and the reduction in the area of fish reservoirs in Ukraine as a result of the full-scale war, which has already caused the loss of the Kakhovske Reservoir and restrictions on fishing in front-line regions, as well as in the basin of the Black and Azov Seas. Against the background of these events, the Dniprovsk Reservoir is gaining strategic fishery importance.

The research methods included control and commercial catches in 2024–2025 in three areas of the Dniprovsk reservoir, biological analysis of fish, determination of age structure, fattening coefficients, number of yearlings, as well as analysis of multi-year ichthyological data. Coefficients of natural fish mortality, fishing effort, sizes of commercial stocks and potential volumes of allowable catch were calculated.

The current dynamics of the number and age structure of populations of Percidae fish species were analyzed, linear-weight indicators were determined, and the physiological state of the fish was assessed. Based on the determined biological and industrial parameters, the volumes of allowable catch for 2026 were forecasted: for pikeperch – 47.5 t, European perch – 67.5 t, for ruffe – 0.11 t. Local manifestations of stiffness in fish from the Samara Bay were identified, which substantiates the need for adaptive fisheries management in the water area of the bay.

Key words: Dniprovsk reservoir, commercial fish, pikeperch, European perch, ruffe, fishery, forecast, biomelioration.

Вступ. Водосховища каскаду Дніпра є ключовими рибогосподарськими водоймами України, де здійснюється промислове рибальство. Риби родини окуневих – зокрема судак звичайний *Sander lucioperca* (Linnaeus, 1758), окунь звичайний *Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758 та йорж звичайний *Gymnocephalus cernua* (Linnaeus, 1758) – посідають важливе місце у складі іхтіофауни цих водосховищ. Судак традиційно вважається цінним промисловим видом риб Дніпровських водосховищ [1], тоді як окунь і йорж менш цінні на ринку рибної продукції.

За останнє десятиліття промисловий вилов риби у внутрішніх водоймах України істотно залежав від уловів у дніпровських водосховищах. Щорічно на внутрішніх водних об'єктах вилучали близько 16–21 тис. тонн риби, з яких до 70% припадало на великі водосховища Дніпра [2].

Протягом останніх років ця частка зростає: у 2023 році майже увесь промисловий вилов припав саме на дніпровські водосховища через втрату контролю над морським рибальством у зв'язку з окупацією Азовського моря та блокуванням Чорного моря.

За даними Державного агентства України з розвитку меліорації, рибного господарства та продовольчих програм у 2023 р. в Україні вилучено 11,19 тис. т водних біоресурсів, що на 11% більше, ніж у 2022 р., але утричі менше за відповідний показник довоєнного періоду (близько 30,5 тис. т до 2022 р.) [3]. Із них на каскад водосховищ Дніпра припало понад 85% вказаного обсягу: Кременчуцьке водосховище дало 4941 тону (44% від загального улову), Кам'янське (Дніпродзержинське) – 2493 т (22%), Дніпровське (Запорізьке) – 729 т, Київське – 714 т, Канівське – 675 т. Для порівняння, улови на Дністрі з лиманом склали 1034 т, у Дунаї – 125 т, тоді як у Каховському водосховищі після його руйнування – 0 т.

Каховське водосховище до руйнації теж мало значні обсяги вилучення – в середньому 2–3 тис. тонн на рік останнім часом. Зокрема у 2020 році в Каховському водосховищі було вилучено до 2,8 тис. т, а у 2021 р. – близько 2,2 тис. т риби, що становило 7–8% від загальноукраїнського вилучення водних біоресурсів. Після підризу греблі у червні 2023 р. Каховське водосховище фактично втрачене разом із його водними біоресурсами.

Повномасштабна війна сильно вплинула на промисел. У прифронтових областях рибальство було обмежене, а частина водойм стали недоступними. Як наслідок, у 2022 році загальний вилов у дніпровських водосховищах різко впав – наприклад, у Дніпровському водосховищі він становив лише 140 тонн, тобто у 8 разів менше, ніж у 2021 році [4]. Ліміти вилучення багатьох видів у 2022 році були використані лише на 2–5%, що вказує на фактичну зупинку промислу під час активних бойових дій. Проте у 2023 році, попри втрату Каховського водосховища, промисел на решті каскаду частково відновився.

Таким чином, динаміка промислового вилучення риби у каскаді Дніпра за останнє десятиліття характеризується поступовим зростанням у 2010-х роках, різким провалом у 2022 р. та частковою компенсацією у 2023 р.

Враховуючи наведені невирішені питання, метою роботи стало провести комплексний аналіз динаміки промислового вилучення окуневих видів риби у Дніпровському водосховищі на прикладі судака звичайного, окуня звичайного та йоржа звичайного, встановити основні тенденції стану популяцій цих видів та окреслити раціональні шляхи їх промислового використання у 2026 році. Досягнення поставленої мети передбачало проведення польових і лабораторних іхтіологічних досліджень, узагальнення даних літератури та звітів із промислового вилучення риби, а також формулювання рекомендацій щодо оцінювання промислового вилучення окуневих видів риби.

Матеріали і методи досліджень. Відбір іхтіологічних проб проводили протягом вегетаційного періоду 2024–2025 рр., під час науково-дослідних контрольних, промислових і малькових ловів у Дніпровському водосховищі на трьох ділянках, які відрізнялись між собою за гідроекологічним станом і рівнем антропогенного навантаження: центральна ділянка у межах м. Дніпро, нижня ділянка водосховища поблизу с. Військове та с. Микільське-на-Дніпрі, та в Самарській затоці в районі с. Одинківка та с. Новоселівка (рис. 1). Також використовували багаторічні бази іхтіологічних даних Дніпровського національного університету імені Олеса Гончара за 2014–2024 рр.

Об'єктом наукових досліджень були три види окуневих риби: судак звичайний, окунь звичайний та йорж

звичайний. Біологічний аналіз риб проводили відповідно до класичних іхтіологічних методів [5, 6]. У риб визначали стать, вік, стандартну та абсолютну довжину тіла, індивідуальну масу, коефіцієнт вгодованості за Фультоном. Вік риб визначали за лускою [6]. Молодь окуневих риб відловлювали у третій декаді липня – першій декаді серпня на мілководних ділянках водосховища. Знаряддям лову була малькова тканка та малькова волокуша завдовжки 10 м із кроком вічка 4 мм. Увесь улов мальків риб піддавали якісному і кількісному аналізу. За відносну чисельність молоді риб приймали кількість цьоголіток на 100 м² площі облову [5].

Усі роботи виконували відповідно до правил біоетики, із дотриманням Європейської Конвенції «Про гуманне ставлення до лабораторних тварин», «Загальних принципів експериментів на тваринах» та відповідно до «Положення про використання тварин в біомедичних експериментах» [7, 8, 9]. Цифрові дані обробляли за допомогою пакетів прикладних програм Microsoft Excel 2024 (Microsoft Corp., 2024) та Statistica 6.0 (StatSoft Inc., 2001).

Результати та їх обговорення. Офіційна статистика промислу у внутрішніх водах найчастіше публікується в агрегованому вигляді – за основними промисловими

групами риб. Судак звичайний традиційно належить до цінних хижих видів, і його вилов контролювався лімітами, тоді як окунь і йорж до 2022 року потрапляли до категорії “інший дрібний частик”. За даними Державного агентства України з розвитку меліорації, рибного господарства та продовольчих у 2023 році в Україні виловлено 528 т судака та 336 т окуня (для порівняння: карася сріблястого – 3112 т, ляща – 2162 т, плітки – 2148 т). Такі обсяги близькі до довоєнних середньорічних значень, хоча і є дещо нижчими: наприклад, у Кременчуцькому водосховищі протягом 2022 року вилов судака становив 139 т, окуня – 96 т.

Треба зазначити, що йорж звичайний не наводиться окремо у статистиці вилову – його промислове значення досить низьке. Йорж трапляється у знаряддях лову як прилов до “іншого дрібного частика” і його річні вилови стабільно низькі. Основний акцент промислу робиться на судаку як на товарній рибі.

За даними Управління Державного агентства з розвитку меліорації, рибного господарства та продовольчих програм у Дніпропетровській області у 2024 році найменший обсяг вилову окуневих риб відзначено у Дніпровському водосховищі – 29 817,6 т (4,35% від загального вилову усіх видів риб) (рис. 2).

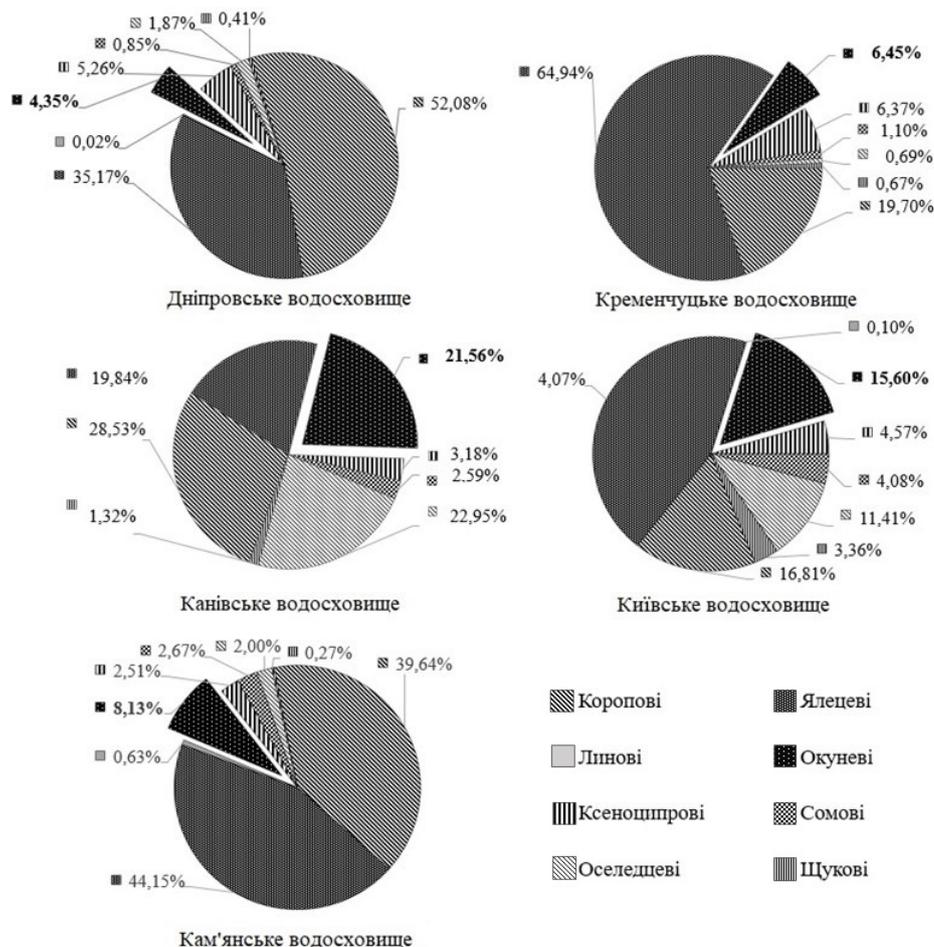


Рис. 2. Відсоткове співвідношення родин риб за біомасою промислових уловів Дніпровських водосховищ в 2024 році, %

Далі йдуть Київське – 90 690,0 т (15,60% від загального вилову усіх видів), Канівське – 110 367,7 т (21,56%) та Кам'янське водосховища – 201 397,4 т (8,13%). Найбільшими показниками вилову характеризувалось Кременчуцьке водосховище – обсяги вилову окуневих риб сягнули 362 608, 5 т (6,45% від загального вилову).

Судак звичайний *Sander lucioperca* (Linnaeus, 1758). Протягом 2016–2021 рр. величини вилову цього виду коливались у межах від 13,0 т у 2016 році до 15,96 т у 2023 році; його промислове освоєння сягало 70–76% від встановленого ліміту [10]. У 2022 році через фактичну відсутність промислу з водосховища було вилучено лише 459 кг судака, що становило близько 1,8 % від встановленого ліміту. У 2023 році вилов судака сягнув 15,96 т, а у 2024 12,98 т.

Віковий ряд судака в контрольних уловах 2025 року нараховував 14 класів (3–16-річки). Ядро промислової популяції складалося з 4–9-річних особин (83,12%). Частка риб старших вікових груп в основному представлена 11–16-річними особинами і складала 1,02%. Крива варіаційного ряду майже не змінилася у порівнянні із минулим роком, мала пік на 6-річних особинах. Далі у меншій кількості йдуть 7-річки та спостерігається поступовий спад кривизни вже з 8-річок.

На початку літа 2025 року коефіцієнти вгодваності за Фультоном у промислових вибірках судака свідчили про задовільний фізіологічний стан популяції. У самців при довжині $34,56 \pm 0,42$ см та масі $635,21 \pm 31,13$ г коефіцієнт вгодваності становив 1,54, тоді як у самиць при довжині $36,32 \pm 0,73$ см та масі $843,23 \pm 42,47$ г – 1,76. Обидва показники перевищують типову для виду норму (1,2–1,5) і вказують на достатню трофічну забезпеченість, сприятливі екологічні умови у водоймі та наявність кормової бази, необхідної для повноцінного росту та відтворення судака.

Улов на 100 сіткодів контрольного порядку у Дніпровському водосховищі склав: у липні 2024 року – 618,22 екз. (670,4 кг), улітку 2023 року – 623,18 екз. (652,6 кг), навесні 2021 року – 534,2 екз. (438,0 кг), восени 2021 року – 521,8 екз. (408,6 кг), улітку 2020 року – 468 екз. (491,4 кг), у 2019 році – 473 екз. (516,2 кг) [11]. У 2025 році спостерігається стабільно високий рівень уловів судака у Дніпровському водосховищі на рівні 630 екземплярів (близько 685 кг) на 100 сіткодів. Основу улову, як і у попередні роки, формують генерації, які вилловлюються сітками з кроком вічка 40–50 мм (до 64% за масою та чисельністю). Потенційне збереження стабільних умов водного середовища забезпечить подальше відновлення промислового стада та підтримку сталого вилову.

У Самарській затоці, де до кінця 2025 року діє науково-біологічне обґрунтування щодо використання дрібновічкових сіток, на сітки з кроком вічка 30–32 мм припадає близько 25% загального улову судака, що пов'язано із тугорослістю особин, яка викликана негативними гідроекологічними умовами затоки та посиленням антропогенним навантаженням на водну екосистему водойми – це потрібно враховувати при веденні промислу на цій ділянці водосховища у 2026 році.

Запас судака на 2026 рік забезпечується генераціями 2019, 2020 та 2021 років – чисельність цього літоку у дані роки становила відповідно 1,87 екз./100 м², 2,26 екз./100 м² та 2,18 екз./100 м². Таким чином, враховуючи коефіцієнт природної смертності (0,23), коефіцієнт вилову (0,21), оцінку показника промзусилля, запас судака у Дніпровському водосховищі можна оцінити у 190 т. Рекомендований ліміт вилову судака у 2026 році не повинен перевищувати 47,5 т.

У Дніпровському водосховищі зберігається помірний негативний антропогенний тиск на популяцію судака, пов'язаний передусім із діяльністю рибалок-любителів. Незважаючи на встановлені законодавчі обмеження щодо мінімально допустимих розмірів для вилову, у практиці любительського рибальства фіксується вилучення особин, які ще не досягли промислових або статевозрілих розмірів. Такий прилов значно знижує чисельність генерацій, які могли б увійти до складу відтворюваної частини популяції у найближчі роки, і порушує природну вікову структуру стада.

З метою стабілізації та нарощування продуктивності популяції судака доцільно впроваджувати комплексні біомеліоративні заходи, зокрема створення захищених ділянок для нересту, регулювання промислового навантаження у пікові сезони. Водночас важливо забезпечити регулярне зариблення водойми мальком або молоддю судака, вирощеною у контрольованих умовах, з урахуванням генетичної відповідності та біологічної сумісності з локальною популяцією.

Запровадження таких заходів дозволить не лише підтримувати чисельність популяції на належному рівні, а й сприятиме підвищенню її стійкості до зовнішніх чинників: кліматичних коливань, гідрологічних змін та трофічної конкуренції з іншими видами.

Йорж звичайний *Gymnocephalus cernua* (Linnaeus, 1758). Представник родини окуневих, типовий донний мешканець річок, озер і водосховищ України. Вид широко розповсюджений у Дніпровському водосховищі, віддає перевагу глибоким ділянкам із мулистим або піщаним дном. Живиться переважно донними безхребетними та личинками комах, нереститься навесні, відкладаючи ікру на твердий субстрат. У біоценозі відіграє важливу роль як об'єкт живлення для хижих риб (судака, щуки). Хоча промислового значення йорж майже не має він впливає на структуру іхтіофауни водойм, зокрема через поїдання ікри інших видів у нерестовий період.

Промислове значення йоржа низьке, оскільки його розміри не перевищують 10–15 см, а маса зазвичай 20–50 г, масового попиту не має. Статистично вилов йоржа окремо раніше враховувався, а вид був включений до групи “інша дрібна риба”.

У уловах рибалок на вудочковій знаряддя трапляються особини віком 3–4 роки. Звичайна довжиною 8–12 см, масою 12–25 г.

У 2023 році у Дніпровському водосховищі в результаті промислового рибальства вилучено 20 кг. В 2024 році вилов промисловою статистикою не зафіксовано. Прогноз вилову йоржа у 2026 році – 0,11 т.

Окунь звичайний *Perca fluviatilis* (Linnaeus, 1758).

Один із найпоширеніших хижих видів прісноводної іхтіофауни України, типовий мешканець озер, річок, водосховищ і заплав. У Дніпровському водосховищі окунь трапляється усюди, переважно у прибережній зоні, затоках та серед заростей вищої водної рослинності. Вид відіграє важливу екологічну і трофічну роль, регулюючи чисельність молоді інших риб та дрібних безхребетних. У рибогосподарському аспекті окунь має постійне промислове значення.

Станом на 2025 рік популяція окуня у Дніпровському водосховищі має досить стабільну вікову та розмірно-вагову структури і, через індивідуальність до нерестового субстрату, високі репродуктивні показники, тому постійно поповнює свою чисельність. У минулі роки щорічні улови окуня були нижчими і стійко трималися на рівні 10–12 т. У промисловому стаді окуня домінують особини 4–10-річного віку (84,3%). У 2023 році з Дніпровського водосховища вилучено 16,7 т окуня. У 2024 році також вилучено 16,7 т.

У Дніпровському водосховищі вилов окуня на 100 сіткодіб контрольного порядку складав: у 2024 році – 250 кг, у 2023 році – 248 кг, у 2021 році – 232 кг, у 2020 році – 210 кг, у 2019 році – 215 кг.

Середні показники промислової довжини окуня становлять: самці – $22,78 \pm 0,55$ см, самки – $24,43 \pm 0,78$ см. Середні показники маси особин: самці – $178,42 \pm 15,16$ г, самки – $267,65 \pm 23,56$ г, – що практично тримається на рівні показників минулих років. У Самарській затоці Дніпровського водосховища в окуня спостерігається відставання у рості на 8,5–10,3%.

Віковий ряд промислових уловів літніх досліджень 2025 року представлений 14 класами (від 2-річних особин – 0,35%, до 14-річних особин – 0,03%). Середній вік окуня, на якому базується промисел, складає 5 років.

Основу промислового запасу 2026 року складуть особини генерації 2021 та 2022 років – чисельність цього літоку у ці роки складала відповідно 12,16 екз./100 м² та 10,57 екз./100 м², що вказує на достатнє природне поповнення окуня молоддю.

Основний вилов окуня у 2025 році припадає на сітки з кроком вічка $a=40$ мм (49,6% за чисельністю та 45,3%

за біомасою). У Самарській затоці окунь освоюється сітками з кроком вічка $a=30-36$ мм, оскільки доведено, що в затоці відмічається тугорослість окуня, яка викликана впливом антропогенних чинників, та наявне науково-біологічне обґрунтування «Науково-біологічне обґрунтування спеціального використання водних біоресурсів на Самарській затоці Дніпровського водосховища».

Таким чином, на 2026 рік сформований достатній запас окуня для його стабільного промислу. Запас окуня у Дніпровському водосховищі оцінюється у 270 т. З огляду на коефіцієнт природної смертності (0,22), прогнозований допустимий вилов окуня у 2026 році може становити 67,5 т.

Висновки

1. Окуневі види риб залишаються важливою частиною промислової іхтіофауни у Дніпровському водосховищі, попри зменшення обсягів промислу в умовах війни.

2. Судак звичайний демонструє стабільну вікову та розмірну структуру популяції та високі коефіцієнти вгодованості. Запас судака оцінено у 190 т, а рекомендований ліміт вилову на 2026 рік – 47,5 т.

3. Окунь звичайний утворює стабільну і стійку популяцію, що щорічно поповнюється завдяки високим репродуктивним можливостям. Запас окуня оцінюється у 270 т, допустимий вилов на 2026 рік – 67,5 т.

4. Йорж звичайний має другорядне промислове значення. Його популяція стабільна, однак обсяги вилову залишаються низькими, прогноз на 2026 рік – 110 кг.

5. У Самарській затоці відмічена тугорослість судака та окуня, що зумовлено незадовільним гідроекологічним станом ділянки водосховища та високим антропогенним тиском на водну екосистему. Це обґрунтовує застосування дрібновічкових сіток у межах регульованого промислу за умов постійного наукового супроводу.

6. Загалом на 2026 рік сформовано достатні промислові запаси як судака, так і окуня, які можуть забезпечувати помірне промислове навантаження за умови дотримання науково обґрунтованих лімітів та відповідального підходу до рибальства.

Література:

- Бузевич, О. А., Прокопенко, С. М. Структурні показники популяції судака (*Sander lucioperca*) Київського водосховища. *Рибогосподарська наука України*. 2016. (4), 25–34 <https://doi.org/10.15407/fsu2016.04.025>
- Бузевич І. Ю., Симон М.Ю. Структурні показники та динаміка промислових уловів риб дніпровських водосховищ. *Рибогосподарська наука України*. 2023. 4(66), 17–34 <https://doi.org/10.61976/fsu2023.04.017>
- Сайт Державного агентства розвитку меліорації, рибного господарства та продовольчих програм. URL: https://darg.gov.ua/vilov_0_1023_menu_0_1.html (дата звернення: 28.07.2025).
- Маренков О., Нестеренко О., Боровик І., Гамолін А., Шамагайло М., Капшук Н. Біологічні показники і промислова експлуатація основних видів риб і річкових раків Запорізького (Дніпровського) водосховища. *ScienceRise: Biological Science*. 2024. 1 (38), 17–30. <https://doi.org/10.15587/2519-8025.2024.301412>
- Арсан О.М., Давидов О.А., Дьяченко Т.М., Євтушенко М.Ю., Жукінський В.М., Кірпенко Н.І., Кіпніс Л.С., Кленус В.Г., Коновець І.М., Линник П.М., Ляшенко А.В., Олійник Г.М., Пашкова О.В., Протасов О.О., Силаєва А.А., Ситник Ю.М., Стойка Ю.О., Тімченко В.М., Шаповал Т.М., Шевченко П.Г., Щербак В.І., Юришинець В.І., Якушин В.М. *Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод*: за ред. В. Д. Романенка. К. : Логос, 2006. 408 с.
- Озінковська С.П., Єрко В.М., Коханова Г.Д., Тарасова О.М., Полторацька В.І. Методика збору і обробки іхтіологічних і гідробіологічних матеріалів з метою визначення лімітів промислового вилучення риб з великих водосховищ і лиманів України. Київ. 1998. 47 с.

7. Хендель, Н. В. Регламентация проведения экспериментов над тваринами: міжнародні та національні правові стандарти. *Український часопис міжнародного права, Спецвипуск: Міжнародно-правові стандарти поводження з тваринами та їх захисту і практика України*. 2013. 71-74.
8. Council Directive 2010/63/EU of 22 September 2010 on the protection of animals used for scientific purposes. *Official Journal of the European Communities*. 2010. L 276, 33–79.
9. Положення про Комітет з питань етики (біоетики). Нормативний документ Міністерства освіти, науки, молоді та спорту України. Наказ від 19.11.2012 № 1287: (офіційний веб-сайт <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1287736-12#Text>) [Електронний ресурс]
10. Федоненко О. В., Маренков О. М. *Промислове освоєння іхтіофауни Запорізького (Дніпровського) водосховища: Довідник*. Дніпро: ЛІРА, 2018. 152 с.
11. Маренков О. М., Нестеренко О. С., Боровик І. І., Шмагайло М. О., Гамолін А. В. Оцінка запасів і прогноз вилову ляща (*Abramis brama* Linnaeus, 1758), сазана (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758), плітки (*Rutilus rutilus* Linnaeus, 1758), карася сріблястого (*Carassius gibelio* Bloch, 1782) та судака (*Sander lucioperca* Linnaeus, 1758) Запорізького (Дніпровського) водосховища на 2025 рік. *Рибогосподарська наука України*. 2024. 4(70), 41–67. <https://doi.org/10.61976/fsu2024.04.041>

References:

1. Buzevych, O. A., Prokopenko, S. M. (2016). Strukturni pokaznyky populatsii sudaka (*Sander lucioperca*) Kyivskoho vodoshovyshcha [Structural indicators of the pike-perch (*Sander lucioperca*) population of the Kyivske Reservoir]. *Rybohospodarska nauka Ukrainy*, (4), 25–34. <https://doi.org/10.15407/fsu2016.04.025> (in Ukrainian)
2. Buzevych I.Yu., Symon M.Yu. (2023). Strukturni pokaznyky ta dynamika promyslovykh uloviv ryb dniprovskykh vodoshovyshch [Structural indicators and dynamics of commercial fish catches in Dnipro River reservoirs]. *Rybohospodarska nauka Ukrainy*, 4(66), 17–34. <https://doi.org/10.61976/fsu2023.04.017> (in Ukrainian)
3. Sait Derzhavnoho ahentstva rozvytku melioratsii, rybnoho hospodarstva ta prodovolchychk prohram. Retrieved from: https://darg.gov.ua/_vilov_0_1023_menu_0_1.html (data zvernennia 28.07.2025)
4. Marenkov O., Nesterenko O., Borovyk I., Hamolin A., Shmahailo M., Kapshuk N. (2024). Biologichni pokaznyky i promyslova ekspluatatsiia osnovnykh vydiv ryb i rikhkovykh rakiv Zaporizkoho (Dniprovskoho) vodoshovyshcha [Biological indicators and commercial exploitation of the main species of fish and crayfish of the Zaporizke (Dniprovsk) reservoir]. *ScienceRise: Biological Science*, 1 (38), 17–30. <https://doi.org/10.15587/2519-8025.2024.301412> (in Ukrainian)
5. Arsan O.M., Davydov O.A., Diachenko T.M., Yevtushenko M.Iu., Zhukinskyi V.M., Kirpenko N.I., Kipnis L.S., Klenus V.H., Konovets I.M., Lynnyk P.M., Liashenko A.V., Oliinyk H.M., Pashkova O.V., Protasov O.O., Sylaiieva A.A., Sytnyk Yu.M., Stoika Yu.O., Timchenko V.M., Shapoval T.M., Shevchenko P.H., Shcherbak V.I., Yuryshynets V.I., Yakushyn V.M. (2006). Metody hidroekologichnykh doslidzhen poverkhnevyykh vod [Methods of hydroecological research of surface waters]: za red. V. D. Romanenka. K. : Lohos, 408 s. (in Ukrainian)
6. Ozinkovska S.P., Yerko V.M., Kokhanova H.D., Tarasova O.M., Poltoratska V.I. (1998). Metodyka zboru i obrobky ikhtiolohichnykh i hidrobiolohichnykh materialiv z metoiu vyznachennia limitiv promysloвого vyluchennia ryb z velykykh vodoshovyshch i lymaniv Ukrainy.[Methods of collection and processing of ichthyological and hydrobiological materials for determining limits of commercial fish extraction from large reservoirs and estuaries of Ukraine] Kyiv, 47 s.(in Ukrainian)
7. Khendel N.V. (2013). Rehlametatsia provedennia eksperymentiv nad tvarynamy: mizhnarodni ta natsionalni pravovi standarty [Regulation of animal experimentation: International and national legal standards]. *Ukrainian Journal of International Law*, 71-76. (in Ukrainian)
8. Council Directive 2010/63/EU of 22 September 2010 on the protection of animals used for scientific purposes. *Official Journal of the European Communities*. 2010. L 276, 33–79.
9. Regulations on the Ethics Committee (Bioethics) (2012), normative document of the Ministry of Education and Science, Youth and Sport of Ukraine, Order No. 1287 dated 19.11.2012. (ofitsiyni veb-sait) <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1287736-12#Text> [Elektronnyi resurs] (in Ukrainian)
10. Fedonenko O. V., Marenkov O. M. (2018). *Promyslove osvoiennia ikhtiofauny Zaporizkoho (Dniprovskoho) vodoshovyshcha: Dovidnyk* [Industrial development of ichthyofauna of the Zaporizke (Dniprovsk) reservoir: Handbook.]. Dnipro: LIRA, 152 s. (in Ukrainian)
11. Marenkov O. M., Nesterenko O. S., Borovyk I. I., Shmahailo M. O., Hamolin A. V. (2024). Otsinka zapasiv i prohnoz vylovu liashcha (*Abramis brama* Linnaeus, 1758), sazana (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758), plitky (*Rutilus rutilus* Linnaeus, 1758), karasia sribliastoho (*Carassius gibelio* Bloch, 1782) ta sudaka (*Sander lucioperca* Linnaeus, 1758) Zaporizkoho (Dniprovskoho) vodoshovyshcha na 2025 rik [Stock assessment and forecast of catches of freshwater bream (*Abramis brama* Linnaeus, 1758), carp (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758), roach (*Rutilus rutilus* Linnaeus, 1758), Prussian carp (*Carassius gibelio* Bloch, 1782) and pike-perch (*Sander lucioperca* Linnaeus, 1758) of the Zaporizhia (Dnipro) reservoir for 2025]. *Rybohospodarska nauka Ukrainy*, 4(70), 41–67. <https://doi.org/10.61976/fsu2024.04.041> (in Ukrainian)

Дата першого надходження рукопису до видання: 19.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 23.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025

АКТИВНІСТЬ ФЕРМЕНТІВ ВУГЛЕВОДНОГО ОБМІНУ У КАРАСЯ ЗВИЧАЙНОГО (*CARASSIUS CARASSIUS*) ЗА АФЛАТОКСИКОЗУ ЯК МАРКЕР ОЦІНКИ ТОКСИЧНОСТІ ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

Матюшко Сергій Миколайович,

аспірант кафедри біології
Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-8655-3201>

Любчиков Руслан Євгенійович,

аспірант кафедри екології, географії та природокористування
Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-2267-9463>

Зміна клімату та зростання антропогенного навантаження на довкілля сприяють поширенню небезпечних токсинів, зокрема мікотоксинів, що становлять загрозу для водних екосистем та аквакультури. Афлатоксин В1 (АФВ1) є одним із найпоширеніших мікотоксинів, що контамінують корми, і його вплив на гідробіонти потребує детального вивчення. Метою дослідження було вивчення впливу афлатоксину В1 на активність ферментів вуглеводного обміну у карася звичайного (*Carassius carassius* L.) як біохімічного маркера для оцінки токсичності водного середовища. Дослідження проводилося на дворічках карася звичайного, яких утримували в 200-літрових акваріумах. Експериментальна група риб піддавалася впливу АФВ1 у концентрації 1,0 мкг/л. Активність ключових ферментів вуглеводного обміну – глюкозо-6-фосфатдегідрогенази (Г-6-ФДГ), лактатдегідрогенази (ЛДГ), ізоцитратдегідрогенази (ІЦДГ) та глюкозо-6-фосфатази (Г-6-Фази) – визначалася в печінці, головному мозку та білих м'язах. Додатково аналізувалися концентрації глюкози та глікогену в цих тканинах.

Результати показали, що вплив АФВ1 спричинив значні зміни в метаболічних процесах. Спостерігалось достовірне підвищення рівня глюкози в печінці (на 110%) та м'язах (на 89%), що супроводжувалося виснаженням запасів глікогену (зниження на 53% та 52% відповідно). Ці зміни свідчать про розвиток стресової гіперглікемії та мобілізацію енергетичних резервів для протидії токсину. Активність ферментів також зазнала значних змін. Активність ЛДГ достовірно зросла в усіх досліджуваних органах (на 90% в печінці, 79% в м'язах та 55% в мозку), тоді як активність ІЦДГ суттєво знизилася (на 53% в печінці, 44% в мозку та 50% в м'язах). Це вказує на перехід організму з аеробного на анаеробний шлях енергетичного обміну, ймовірно, внаслідок мітохондріального пошкодження. Водночас, активність Г-6-ФДГ зросла в печінці та м'язах (на 105% та 64%), що є свідченням активації пентозофосфатного шляху для синтезу НАДФН, необхідного для антиоксидантного захисту та детоксикації.

Висновки підтверджують, що зміни в активності ферментів вуглеводного обміну та концентрації глюкози і глікогену є чутливими біохімічними індикаторами токсичного впливу афлатоксину В1. Ці показники можуть слугувати надійними та інформативними маркерами для моніторингу та оцінки рівня токсичності водного середовища, що є критично важливим для охорони навколишнього середовища та забезпечення якості продукції аквакультури.

Ключові слова: афлатоксин В1, карась звичайний, вуглеводний обмін, біомаркери, токсичність, водне середовище, оцінка токсичності, ферменти.

Matiushko Sergii, Liubchikov Ruslan. Carbohydrate metabolism enzyme activity in Crucian carp (*Carassius carassius*) under aflatoxicosis as a biomarker for aquatic environment toxicity assessment

Climate change and the increasing anthropogenic load on the environment contribute to the spread of hazardous toxins, particularly mycotoxins, which pose a threat to aquatic ecosystems and aquaculture. Aflatoxin B1 (AFB1) is one of the most common mycotoxins contaminating feed, and its effect on aquatic organisms requires detailed study. The aim of the study was to investigate the effect of aflatoxin B1 on the activity of carbohydrate metabolism enzymes in crucian carp (*Carassius carassius* L.), using this as a biochemical marker to assess the toxicity of the aquatic environment. The study was conducted on 2-year-old crucian carp kept in 200-liter aquariums. The experimental group of fish was exposed to AFB1 at a concentration of 1.0 µg/L. The activity of key enzymes of carbohydrate metabolism – glucose-6-phosphate dehydrogenase (G-6-FDG), lactate dehydrogenase (LDH), isocitrate dehydrogenase (ICDH) and glucose-6-phosphatase (G-6-Phase) – was determined in the liver, brain and white muscles. Additionally, glucose and glycogen concentrations in these tissues were analyzed. The results showed that the effect of AFB1 caused significant changes in metabolic processes. A significant increase in glucose levels in the liver (by 110%) and muscles (by 89%) was observed, which was accompanied by depletion of glycogen stores (a decrease of 53% and 52%, respectively). These changes indicate the development of stress hyperglycemia and the mobilization of energy reserves to counteract the toxin. Enzyme activity also underwent significant changes. LDH activity significantly increased in all studied organs (by 90% in the liver, 79% in the muscles and 55% in the brain), while ICDGH activity significantly decreased (by 53% in the liver, 44% in the brain and 50% in the muscles). This indicates the transition of the organism from the aerobic to the anaerobic pathway of energy metabolism, probably due to mitochondrial damage. At the same time, the activity of G-6-FDG increased in the liver and muscles (by 105% and 64%), which is evidence of the activation of the pentose phosphate pathway for the synthesis of NADPH, which is necessary for antioxidant protection and detoxification.

The findings confirm that changes in the activity of carbohydrate metabolism enzymes and glucose and glycogen concentrations are sensitive biochemical indicators of the toxic effects of aflatoxin B1. These indicators can serve as reliable and informative markers for monitoring and assessing the level of toxicity of the aquatic environment, which is critically important for environmental protection and ensuring the quality of aquaculture products.

Key words: aflatoxin B1, common crucian carp, carbohydrate metabolism, biomarkers, toxicity, aquatic environment, toxicity assessment, enzymes.

Вступ. Зміна клімату та забруднення довкілля є глобальними викликами, що призводять до значного поширення токсинів, зокрема мікотоксинів, які негативно впливають на живі організми та екосистеми загалом. За прогнозами, потепління клімату сприятиме збільшенню контамінації кукурудзи та інших сільськогосподарських культур афлатоксином В1, що ставить під загрозу харчову безпеку [1]. Це, своєю чергою, призводить до зростання рівня мікотоксинів у кормах для аквакультури, що було підтверджено у результаті глобальних досліджень [2].

Забруднення водного середовища, зокрема кормами, контамінованими мікотоксинами, спричиняє значні зміни в організмі риб. Такі зміни можуть проявлятися у вигляді адаптивних реакцій організму, включаючи зміни в показниках крові [3; 4], а також впливати на їхтіологічні показники корошових риб [5]. Дослідження показують, що мікотоксини можуть накопичуватися в м'язах риб, що становить загрозу не лише для водних організмів, але й для людини, яка споживає їх у їжу [6]. Токсини, потрапляючи в організм риб, викликають деградацію ліпідів [7] та можуть призводити до значних метаболічних адаптацій, які є предметом вивчення сучасної біології [8].

Афлатоксин В1 (АФВ1) є одним із найпоширеніших та найтоксичніших мікотоксинів, який може біоакмулюватися в організмі риб [9]. Вплив АФВ1 на водних мешканців проявляється у зміні фізіологічного стану, що включає погіршення росту, порушення імунної відповіді та антиоксидантного статусу [10]. Вуглеводний обмін є одним з найчутливіших індикаторів фізіологічного стану риб, оскільки ферменти, що беруть участь у ньому, швидко реагують на стресові фактори. Це робить їх потенційними біохімічними маркерами для оцінки рівня токсичності водного середовища.

Попри значну кількість досліджень, присвячених впливу афлатоксину В1 на риб, більшість з них зосереджені на промислово важливих видах, тоді як карась звичайний як модельний об'єкт залишається недостатньо вивченим. Недостатньо даних щодо біохімічних механізмів адаптації цього виду до дії мікотоксинів, зокрема впливу на вуглеводний обмін. Така прогалина у знаннях обмежує можливості використання карася як індикаторного виду для оцінки токсичності водного середовища та знижує ефективність розробки екологічних стратегій у сфері рибництва та аквакультури.

Метою нашої роботи є вивчення впливу афлатоксину В1 на активність ферментів вуглеводного обміну у карася звичайного як біохімічного маркера для оцінки рівня токсичності водного середовища.

Матеріали та методи. Дослідження впливу мікотоксину було проведено на дворічках карася звичай-

ного (*Carassius carassius* L.), вирощених у ВАТ «Чернігіврибгосп» у період з 2024 по 2025 рр. Експеримент проводили в 200-літрових акваріумах. Гідрохімічні показники води, що використовувалася для утримання риби, відповідали рибоводно-біологічним нормам: рН $7,30 \pm 0,27$; вміст розчиненого кисню $5,6 \pm 0,4$ мг/дм³. Температура води відповідала природним умовам. Маса риби становила 200–300 г.

Для проведення експерименту було створено дві групи риб: контрольну та дослідну. Дослідній групі додавали афлатоксин В1 (АФВ1) у концентрації 1,0 мкг/л.

Дослідження проводили на дворічних карасях звичайних (*Carassius carassius* L.), утримуваних у 200-літрових акваріумах. У дослідній групі кожна вибірка складала 20 особин. Риб зазнавали дії афлатоксину В1 у концентрації 1,0 мкг/л. У печінці, мозку та білих м'язах визначали активність ключових ферментів вуглеводного обміну: глюкозо-6-фосфатдегідрогенази (G-6-FDG), лактатдегідрогенази (LDH), ізоцитратдегідрогенази (ICDH), глюкозо-6-фосфатази (G-6-Phase).

Активність ферментів вуглеводного обміну визначали в наступних органах: головному мозку, білих м'язах та печінці. Для цього готували гомогенат тканин на 0,25 М сахарозі у співвідношенні 1:10. Ядра, мітохондрії та мікросоми виділяли згідно із загальноприйнятими методиками [11; 12], з урахуванням особливостей фракціонування гомогенатів тканин риб [13]. Додатково мітохондрії очищали центрифугуванням у градієнті щільності сахарози (0,32-1,2 М) у горизонтальному роторі при 75000 г протягом 60 хвилин при +4°C.

Активність глюкозо-6-фосфатдегідрогенази (Г-6-ФДГ, КФ 1.1.1.49) визначали спектрофотометрично при довжині хвилі 340 нм (Biochemica Information, 1975). Активність виражали в мкмоль NADP/мг білка за хв. Активність ізоцитратдегідрогенази (ІЦДГ, КФ 1.1.1.41) визначали в мітохондріальній фракції гомогенатів, виражаючи її в мкмоль НАДРН на 1 мг білка за 1 хв [11]. Активність лактатдегідрогенази (ЛДГ, КФ 1.1.1.27) визначали спектрофотометрично за зміною оптичної щільності окислення NADH при 340 нм [12]. Активність виражали в мкмоль NADH/мг білка за хв. Активність глюкозо-6-фосфатази (Г-6-Фаза, КФ.3.1.3.9) визначали в надосадовій фракції гомогенатів, виражаючи її в мкмоль неорганічного фосфору (Pi) за 1 хв на 1 мг білка [12].

Вміст білка у ферментативних препаратах визначали методом Лоурі та ін. [14]. Концентрацію глюкози та глікогену визначали глюкооксидазним методом згідно з інструкцією до лабораторного набору АТ "Реагент" (Україна). Статистичну обробку даних проводили

за допомогою Microsoft Excel. Достовірність різниці між середніми арифметичними величинами визначали за допомогою t-критерію Стьюдента. Відмінності вважали статистично достовірними при $P < 0,05$. Тварин утримували та декапітували відповідно до етичних принципів поводження [15]

Результати. Вплив афлатоксину В1 на метаболізм карася звичайного спричинив значні зміни в активності ключових ферментів вуглеводного обміну, а також у концентрації глюкози та глікогену. Отримані дані підтверджують гіпотезу про те, що ці показники можуть слугувати біохімічними маркерами токсичного впливу. Як показано в таблиці 1, вплив афлатоксину В1 в концентрації 1,0 мкг/л призвів до значних змін у запасах глікогену та рівні глюкози в тканинах карася звичайного.

Спостерігалось значне збільшення концентрації глюкози як у печінці (на 110%), так і в м'язах (на 89%). Це є типовою реакцією організму риб на стрес, відомою як стресова гіперглікемія. Така мобілізація глюкози є захисним механізмом, що забезпечує клітини додатковою енергією для боротьби з токсичним впливом.

Концентрація глікогену в печінці та м'язах, навпаки, достовірно знизилася (на 53% та 52% відповідно). Це свідчить про інтенсивний глікогеноліз – процес розпаду глікогену, необхідний для швидкого поповнення пулу глюкози. Ці зміни вказують на те, що організм активно використовує свої енергетичні резерви для компенсації негативної дії токсину.

В Таблиці 2 представлені дані про зміни в активності ключових ферментів, що регулюють вуглеводний обмін.

Активність Г-6-ФДГ достовірно зросла в печінці (на 105%) та білих м'язах (на 64%), тоді як у головному мозку зміни були незначними. Таке зростання вказує на активацію пентозофосфатного шляху, який генерує НАДФН. НАДФН, своєю чергою, є кофактором для антиоксидантних ферментів, що допомагають організму знешкоджувати токсичні сполуки. Збільшення активності глюкозо-6-фосфатдегідрогенази (Г-6-ФДГ) у печінці та м'язах є важливою адаптивною реакцією. Це свідчить про посилення пентозофосфатного шляху, який необхідний для синтезу НАДФН. НАДФН, своєю чергою, є ключовим компонентом антиоксидантних систем, що захищають клітини від окисного стресу, спричиненого токсинами. Це узгоджується з даними, що токсичний вплив гербіцидів та інших поверхнево-активних речовин також викликає зміни у активності ферментів енергетичного метаболізму у коропа [16].

Активність ЛДГ значно підвищилася у всіх досліджуваних органах: в печінці (на 90%), м'язах (на 79%) та головному мозку (на 55%). Це свідчить про посилення анаеробного гліколізу. Такий перехід на анаеробний шлях отримання енергії може бути викликаний порушенням мітохондріального дихання під впливом АФВ1.

Спостерігалось достовірне зниження активності ЩДГ у всіх органах (на 53% в печінці, 44% в головному мозку та майже 50% в м'язах). Це є прямим свідченням пригнічення циклу Кребса та, як наслідок, аеробного енергетичного обміну. Значне зростання активності лактатдегідрогенази (ЛДГ) та зниження активності ізоцитратдегідрогенази (ЩДГ) в усіх органах вказує на зміну шляхів енергетичного обміну. Організм перехо-

Таблиця 1

Вміст глюкози та глікогену в тканинах карася звичайного за афлатоксикозу, мкмоль/г сирової маси ($M \pm m, n=5$)

Показник	Орган	Контроль	АФВ1 (1,0 мкг/л)
Глюкоза	Печінка	1,21 ± 0,11	2,54 ± 0,23*
	Білі м'язи	0,98 ± 0,09	1,85 ± 0,17*
Глікоген	Печінка	11,5 ± 0,9	5,4 ± 0,5*
	Білі м'язи	8,7 ± 0,8	4,1 ± 0,4*

Примітка: * – $P < 0,05$ у порівнянні з контролем

Таблиця 2

Зміни активності ключових ферментів, що регулюють вуглеводний обмін карася звичайного за афлатоксикозу ($M \pm m, n=5$)

Фермент	Орган	Контроль	АФВ1 (1,0 мкг/л)
Г-6-ФДГ (мкмоль NADP/мг білка/хв)	Печінка	0,22 ± 0,02	0,45 ± 0,04*
	Головний мозок	0,18 ± 0,02	0,19 ± 0,02
	Білі м'язи	0,11 ± 0,01	0,18 ± 0,02*
ЛДГ (мкмоль NADH/мг білка/хв)	Печінка	1,51 ± 0,14	2,87 ± 0,26*
	Білі м'язи	2,75 ± 0,25	4,92 ± 0,44*
	Головний мозок	0,98 ± 0,09	1,52 ± 0,14*
ЩДГ (мкмоль НАДРН/мг білка/хв)	Печінка	0,74 ± 0,07	0,35 ± 0,03*
	Головний мозок	0,55 ± 0,05	0,31 ± 0,03*
	Білі м'язи	0,42 ± 0,04	0,22 ± 0,02*
Г-6-Фаза (мкмоль Рі/мг білка/хв)	Печінка	0,15 ± 0,01	0,28 ± 0,02*

дять з аеробного (цикл Кребса) на анаеробний (гліколіз) шлях отримання енергії. Цей механізм допомагає клітинам вижити в умовах стресу, коли мітохондріальне дихання пригнічене. Такі адаптивні зміни у біохімічних показниках гідробіонтів у відповідь на токсичну дію інших речовин є добре вивченим явищем [17; 18; 19], що підтверджує одержані нами результати для афлатоксину В1.

Активність Г-6Фази в печінці збільшилася на 87%, що підтверджує дані про зниження глікогену. Посилена робота Г-6-Фази забезпечує надходження глюкози в кров для підтримання високого рівня енергії в умовах токсичного стресу. Спостережувана стресова гіперглікемія (збільшення рівня глюкози) та виснаження запасів глікогену в печінці та м'язах є прямою відповіддю на токсичний стрес. Активація глюкозо-6-фосфатази (Г-6-Фаза), ключового ферменту, що вивільняє глюкозу в кров, підтверджує цей процес. Подібні метаболічні зміни були зафіксовані в інших дослідженнях. Зокрема, було показано, що дієтичний афлатоксин В1 негативно впливає на ріст та метаболізм, а також цілісність тканин у молодого морського ляща (*Sparus aurata*), що свідчить про схожі механізми токсичного впливу на обмінні процеси у різних видів риб [20].

Афлатоксин В1 належить до найтоксичніших мікотоксинів, які утворюються грибами роду *Aspergillus* під час зберігання та транспортування зернових культур і можуть забруднювати корми для аквакультури. Потрапляння цього токсину у водне середовище найчастіше відбувається через використання контамінованих кормів та змиви із сільськогосподарських угідь, що становить серйозну екологічну проблему [21]. Наявні дослідження свідчать, що навіть низькі концентрації афлатоксину В1 здатні викликати істотні порушення метаболізму, включаючи процеси росту, білкового та ліпідного обміну, а також функціональний стан

печінки у риб [22; 23]. Отримані нами результати підтверджують, що АФВ1 спричиняє виражені біохімічні зміни в організмі карася звичайного, зокрема у системі вуглеводного обміну. Це дозволяє розглядати його як один із ключових токсичних чинників, що може обмежувати рибопродуктивність і становити потенційну загрозу для харчової безпеки [21; 23].

Таким чином, виявлені зміни в активності ферментів (ЛДГ, ЩДГ, Г-6-ФДГ) та концентрації метаболітів (глюкоза, глікоген) у карася звичайного є не лише підтвердженням загальних закономірностей біохімічних адаптацій гідробіонтів до токсичного стресу, але й підкреслюють чутливість саме вуглеводного обміну до дії афлатоксину В1. Це робить їх ефективними та інформативними біохімічними маркерами для моніторингу екологічного стану водного середовища.

Висновки. Проведені дослідження вказують на те, що вплив афлатоксину В1 призводить до системних метаболічних порушень у карася звичайного. Зміни в активності ЛДГ та ЩДГ демонструють переключення організму з аеробного на анаеробний шлях отримання енергії, тоді як підвищення активності Г-6-ФДГ є індикатором активації захисних механізмів детоксикації. Зміна концентрації глюкози та глікогену також підтверджує цей стресовий стан. Таким чином, активність ферментів вуглеводного обміну та вміст глікогену можуть слугувати надійними та чутливими біохімічними маркерами для моніторингу та оцінки токсичності водного середовища, зокрема афлатоксином В1. Афлатоксин В1 слід розглядати не лише як лабораторну модель токсичного впливу, але й як реальний екологічний чинник, джерела якого пов'язані з аграрною діяльністю та аквакультурою. Урахування шляхів його надходження у водойми є необхідним для оцінки екологічних ризиків і розробки заходів із запобігання забрудненню водного середовища.

Література:

1. Battilani, P., Toscano, P., van der Fels-Klerx, H. J., Moretti, A., Leggieri Camardo, M., Brera, C., et al.. Aflatoxin B1 contamination in maize in Europe increases due to climate change. *Sci. Rep.* 2013. 6, 24328. <https://doi.org/10.1038/srep24328>
2. Gruber-Dorninger, C., Müller, A., Rosen, R. Multi-Mycotoxin Contamination of Aquaculture Feed: A Global Survey. *Toxins*. 2025. Т. 17. № 3. С. 116. <https://doi.org/10.3390/toxins17030116>
3. Ніколаєнко Т., Іващенко М., Іващенко Н., Мехед О. Адаптивні зміни показників крові коропа лускатого (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) як відповідь на забруднення води. *Природні ресурси прикордонних територій в умовах зміни клімату*. Десна-Поліграф. 2023. С. 99-100
4. Желай М., Ячна М., Мехед О., Третяк О. Адаптивні зміни іхтіологічних показників корошових риб за дії мікотоксину Т2. *Природні ресурси прикордонних територій в умовах зміни клімату*. Чернігів : Десна-Поліграф. 2023. С. 77-78.
5. Желай М. В., Полотнянко Л. В., Ячна М. Г., Мехед О. Б., Третяк О. П. Вплив мікотоксину Т2 на іхтіологічні показники корошових риб. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка*. Серія: Біологія. 2023. Т. 84, №1. С. 35-40 <https://doi.org/10.25128/2078-2357.24.1.5>
6. Полотнянко Л., Мехед О. Накопичення мікотоксинів у м'язах коропа лускатого (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) при згодовуванні корму, контамінованого Т2-токсиком. *Природні ресурси прикордонних територій в умовах зміни клімату*. Чернігів : Десна-Поліграф. 2023. С. 105-106
7. Symonova, N. A., Mekhed, O. V., Kupchyk, O. Y., & Tretyak, O. P. Toxicants in the degradation of lipids in the organism of scaly carp. *Ukrainian Journal of Ecology*, 2018. 8(4), 6-10.
8. Грубінко В.В. Системна оцінка метаболічних адаптацій у гідробіонтів. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка*. Серія: Біологія. 2005. № 2. С. 36–39.
9. Deng, Y., Deng, Q., Wang, Y., Sun, L., Wang, R., Ye, L., Liao, J., Gooneratne, R. Tolerance and bio-accumulation of aflatoxin B1 in invertebrate *Litopenaeus vannamei* and vertebrate *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture*, 2020. 524, 735055. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020>

10. Chen, S., Gan, L., Guo, Y., Liu, Y., Tian, L. Changes in growth performance, aflatoxin B1 residues, immune response and antioxidant status of *Litopenaeus vannamei* fed with AFB1-contaminated diets and the regulating effect of dietary myoinositol supplementation. *Food Chem.*, 2020. 324, 126888 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126888>.
11. Biochemica Information. Western Germany: Boehringer Mannheim GmbH. Bd., 1975. 1, 99–100.
12. Biochemica Information. Western Germany: Boehringer Mannheim GmbH. Bd., 1975. 2, 167.
13. Casey, C. A., & Anderson, P. M. Subcellular location of glutamine synthetase and urea cycle enzymes in liver of Spiny Dogfish (*Squalus acanthias*). *Journal of Biological Chemistry*, 1972. 257(14), 8449–8453
14. Lowry, O., Rosebrough, N., Farr, A., & Randall, R. Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J. Biol. Chem.*, 1951. 193, 265–275. [https://www.jbc.org/article/S0021-9258\(19\)52451-6/pdf](https://www.jbc.org/article/S0021-9258(19)52451-6/pdf)
15. World Medical Association. World Medical Association Declaration of Helsinki. Ethical principles for medical research involving human subjects. *JAMA*, 2013. 310(20), 2191-2194. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>
16. Yakovenko B. V., Tretyak O. P., Mekhed O. B., Iskevych O.V. Effect of herbicides and surfactants on enzymes of energy metabolism of the *Caprinus carpio*. *Ukrainian Journal of Ecology*, 2018. № 8(1). 948 – 952 <http://dx.doi.org/10.1615/HydrobJ.v55.i3.80>
17. Mekhed O. Changes in the biochemical indicators of hydrobionts in response to the toxic effect of mycotoxin T2. *One World – One Health*, 2024. 263-266
18. Мехед О. Б., Яковенко Б. В. Активність ключових ферментів вуглеводного обміну коропа лускатого в умовах токсикозу. *Visnyk problem biolohii ta medytsyny*. 2003. 6, 20–25.
19. Mekhed, O. B., Yakovenko, B. V., Zhidenko, A. A. Activity of some enzymes of carbohydrate metabolism in tissues of yearlings and two-years-old carps in the autumn time. *Hydrobiological Journal*, 2004. 40 (5), 77–84.
20. Barany, A., Guilloto, M., Cosano, J., de Boevre, M., Oliva, M., de Saeger, S., Fuentes, J., Martínez-Rodríguez, G., Mancera, J.M., Dietary aflatoxin B1 (AFB1) reduces growth performance, impacting growth axis, metabolism, and tissue integrity in juvenile gilthead sea bream (*Sparus aurata*). *Aquaculture*, 2021. 533, 736189. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736189>.
21. Bashorun A., Hassan Z. U., Al-Yafei M. A., Jaoua S. Fungal contamination and mycotoxins in aquafeed and tissues of aquaculture fishes and their biological control. *Aquaculture*. 2023. 576. 01–08. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739892>.
22. Liu H., Xie R., Huang W., Yang Y., Zhou M., Lu B., Li B., Tan B., Dong X. Negative effects of aflatoxin B1 (AFB1) in the diet on growth performance, protein and lipid metabolism, and liver health of juvenile hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* *Epinephelus lanceolatus*♂). *Aquaculture Reports*. 2023. T. 33. C. 101779. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101779>.
23. Fornari D.C., Peixoto S., Ksepka S.P., Bullard S.A., Rossi W., Nuzback D.E., Davis D.A. Effects of dietary mycotoxins and mycotoxin adsorbent additives on production performance, hematological parameters, and liver histology in juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Frontiers in Animal Science*. 2023. T. 4. C. 1281722. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1281722>.

References:

1. Battilani, P., Toscano, P., van der Fels-Klerx, H. J., Moretti, A., Leggieri Camardo, M., Brera, C., et al. (2013). Aflatoxin B1 contamination in maize in Europe increases due to climate change. *Sci. Rep.*, 6, 24328. <https://doi.org/10.1038/srep24328>
2. Gruber-Dorninger, C., Müller, A., & Rosen, R. (2025). Multi-Mycotoxin Contamination of Aquaculture Feed: A Global Survey. *Toxins*, 17(3), 116. <https://doi.org/10.3390/toxins17030116>
3. Nikolaenko, T., Ivashchenko, M., Ivashchenko, N., & Mekhed, O. (2023). Adaptive changes in blood parameters of scaled carp (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) as a response to water pollution]. In *Pryrodni resursy prykordonykh terytorii v umovakh zminy klimatu* (pp. 99–100). Desna-Polihraf. [in Ukrainian]
4. Zhelai, M., Yachna, M., Mekhed, O., & Tretyak, O. (2023). Adaptive changes of ichthyological parameters of carp fish under the influence of mycotoxin T2]. In *Pryrodni resursy prykordonykh terytorii v umovakh zminy klimatu* (pp. 77–78). Desna-Polihraf. [in Ukrainian]
5. Zhelai, M. V., Polotnyanko, L. V., Yachna, M. H., Mekhed, O. B., & Tretyak, O. P. (2023). Vplyv mikotoksynu T2 na ikhtiolohichni pokaznyky koropovykh ryb [Influence of mycotoxin T2 on ichthyological parameters of carp fish]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Seriya: Biolohiia*, 84(1), 35–40. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.24.1.5> [in Ukrainian]
6. Polotnyanko, L., & Mekhed, O. (2023). Nakopychennia mikotoksyniv u m'iazakh koropa luskatoho (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) pry zghodovuvanni kormu, kontaminovanoho T2-toksynom [Accumulation of mycotoxins in the muscles of scaled carp (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) when fed with T2-toxin contaminated feed]. In *Pryrodni resursy prykordonykh terytorii v umovakh zminy klimatu* (pp. 105–106). Desna-Polihraf. [in Ukrainian]
7. Symonova, N. A., Mekhed, O. B., Kupchuk, O. Y., & Tretyak, O. P. (2018). Toxicants in the degradation of lipids in the organism of scaly carp. *Ukrainian Journal of Ecology*, 8(4), 6–10.
8. Hrubinko, V. V. (2005). Systemna otsinka metabolichnykh adaptatsii u hidrobiontiv [Systemic assessment of metabolic adaptations in hydrobionts]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Seriya: Biolohiia*, (2), 36–39. [in Ukrainian]
9. Deng, Y., Deng, Q., Wang, Y., Sun, L., Wang, R., Ye, L., Liao, J., & Gooneratne, R. (2020). Tolerance and bioaccumulation of aflatoxin B1 in invertebrate *Litopenaeus vannamei* and vertebrate *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture*, 524, 735055. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735055>

10. Chen, S., Gan, L., Guo, Y., Liu, Y., & Tian, L. (2020). Changes in growth performance, aflatoxin B1 residues, immune response and antioxidant status of *Litopenaeus vannamei* fed with AFB1-contaminated diets and the regulating effect of dietary myoinositol supplementation. *Food Chem.*, 324, 126888. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126888>
11. *Biochemica Information*. (1975). (Vol. 1). Boehringer Mannheim GmbH.
12. *Biochemica Information*. (1975). (Vol. 2). Boehringer Mannheim GmbH.
13. Casey, C. A., & Anderson, P. M. (1972). Subcellular location of glutamine synthetase and urea cycle enzymes in liver of Spiny Dogfish (*Squalus acanthias*). *Journal of Biological Chemistry*, 257(14), 8449–8453.
14. Lowry, O., Rosebrough, N., Farr, A., & Randall, R. (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J. Biol. Chem.*, 193, 265–275. [https://www.jbc.org/article/S0021-9258\(19\)52451-6/pdf](https://www.jbc.org/article/S0021-9258(19)52451-6/pdf)
15. World Medical Association. (2013). World Medical Association Declaration of Helsinki. Ethical principles for medical research involving human subjects. *JAMA*, 310(20), 2191–2194. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>
16. Yakovenko, B. V., Tretyak, O. P., Mekhed, O. B., & Iskevych, O. V. (2018). Effect of herbicides and surfactants on enzymes of energy metabolism of the *Cyprinus carpio*. *Ukrainian Journal of Ecology*, 8(1), 948–952. <http://dx.doi.org/10.1615/HydrobJ.v55.i3.80>
17. Mekhed, O. (2024). Changes in the biochemical indicators of hydrobionts in response to the toxic effect of mycotoxin T2. In *One World – One Health* (pp. 263–266). Słupsk.
18. Mekhed, O. B., & Yakovenko, B. V. (2003). Aktyvnist klyuchovykh fermentiv vuhlevodnoho obminu koropa luskatoho v umovakh toksykozu [Activity of key carbohydrate metabolism enzymes in scaled carp under toxicosis]. *Visnyk problem biolohii ta medytsyny*, (6), 20–25. [in Ukrainian]
19. Mekhed, O. B., Yakovenko, B. V., & Zhidenko, A. A. (2004). Activity of some enzymes of carbohydrate metabolism in tissues of yearlings and two-years-old carps in the autumn time. *Hydrobiological Journal*, 40(5), 77–84.
20. Barany, A., Guilloto, M., Cosano, J., de Boevre, M., Oliva, M., de Saeger, S., Fuentes, J., Martínez-Rodríguez, G., & Mancera, J. M. (2021). Dietary aflatoxin B1 (AFB1) reduces growth performance, impacting growth axis, metabolism, and tissue integrity in juvenile gilthead sea bream (*Sparus aurata*). *Aquaculture*, 533, 736189. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736189>
21. Bashorun, A., Hassan, Z. U., Al-Yafei, M. A. & Jaoua, S. (2023). Fungal contamination and mycotoxins in aquafeed and tissues of aquaculture fishes and their biological control. *Aquaculture*. 576. pp. 01–08. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739892> [in English].
22. Liu, H., Xie, R., Huang, W., Yang, Y., Zhou, M., Lu, B., Li, B., Tan, B., & Dong, X. (2023). Negative effects of aflatoxin B1 (AFB1) in the diet on growth performance, protein and lipid metabolism, and liver health of juvenile hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* *Epinephelus lanceolatus*). *Aquaculture Reports*, 33, p. 101779. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101779> [in English].
23. Fornari, D.C., Peixoto, S., Ksepka, S.P., Bullard, S.A., Rossi, W., Nuzback, D.E., & Davis, D.A. (2023). Effects of dietary mycotoxins and mycotoxin adsorbent additives on production performance, hematological parameters, and liver histology in juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Frontiers in Animal Science*, 4, p. 1281722. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1281722> [in English]

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 24.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025

АГРОЕКОЛОГІЧНИЙ СТАН СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ЗЕМЕЛЬ ЖИТОМИРСЬКОЇ ОБЛАСТІ: АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА НАПРЯМИ ОПТИМІЗАЦІЇ

Мельник-Шамрай Вікторія Вікторівна,

кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри екології та природоохоронних технологій

Державного університету «Житомирська політехніка»

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3551-5085>

Scopus Author ID: 57207858684

Web of Science Researcher ID: GYJ-7714-2022

Шамрай Володимир Ігорович,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри гірничих технологій та будівництва імені проф. Бакка М.Т.

Державного університету «Житомирська політехніка»

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9441-9379>

Scopus Author ID: 57188738438

Web of Science Researcher ID: CCX-5772-2022

У статті представлено критичний синтез та аналітичний огляд сучасного агроекологічного стану сільськогосподарських земель Житомирської області на основі офіційних статистичних даних. Земельний фонд Житомирської області становить 2982,7 тис. га, де сільськогосподарські угіддя займають 1510,1 тис. га, з яких на ріллію припадає майже 74,0 %. На території Житомирської області переважають дерново-підзолисті піщані та супіщані ґрунти, а також на пониженних ділянках рельєфу зустрічаються торф'яно-болотні ґрунти. Дані ґрунти характеризуються низьким вмістом гумусу, слабкою структурою та високою кислотністю, що робить їх особливо вразливими до деградаційних процесів, зокрема водної та вітрової ерозії, ущільнення, закислення, а також до впливу радіоактивного забруднення внаслідок аварії на ЧАЕС. Інтенсивне використання ґрунтового покриву області зумовлює активізацію деградаційних процесів, порушення структури ґрунту та втрати родючості. Погіршення стану ґрунтового покриву Житомирської області підтверджується результатами агрохімічних обстежень. Так, середньозважений показник вмісту гумусу в ґрунті становить 2,03%, що в 1,6 разів менше порівняно з середнім значенням по Україні. Забезпеченість ґрунтів Житомирської області основними поживними елементами, необхідними для росту та розвитку рослин – калієм (78 мг/кг) і азотом (86 мг/кг) – залишається на недостатньому рівні, а от вміст рухомих сполук фосфору (114 мг/кг) відповідає достатньому рівню. Аналіз внесення добрив у сільськогосподарських підприємствах Житомирської області у порівнянні з попереднім роком свідчить про перевагу органічних добрив над мінеральними (у 6,3 рази). Основними засобами захисту сільськогосподарських культур в регіоні є гербіциди (73,1 %) та фунгіциди і бактерициди (20,8%). Проте таке інтенсивне застосування даних речовин потребує постійного перегляду та адаптації стратегії захисту рослин з урахуванням екологічних ризиків, з метою мінімізації негативного впливу на ґрунтовий покрив. Автори статті пропонують впровадження комплексного підходу до збереження та раціонального використання ґрунтового покриву, що включає агрохімічні, агротехнічні, протиерозійні, управлінські та екологічно-економічні заходи, спрямовані на відновлення родючості ґрунтів і забезпечення сталого землекористування.

Ключові слова: ґрунтовий покрив, сільськогосподарські землі, земельні ресурси, деградація ґрунтів, агрохімічний стан, охорона земель, раціональне використання.

Melnyk-Shamrai Viktoriia, Shamrai Volodymyr. Agroecological state of agricultural lands in Zhytomyr region: an analytical review and optimization directions

This article presents a critical synthesis and analytical review of the current agroecological state of agricultural lands in the Zhytomyr region based on official statistical. The land fund of Zhytomyr region amounts to 2982.7 thousand hectares, with agricultural lands occupying 1510.1 thousand hectares, of which arable land accounts for almost 74.0 %. Sod-podzolic sandy and loamy-sandy soils prevail in Zhytomyr region, while peat-bog soils are found in lower relief areas. These soils are characterized by low humus content, weak structure, and high acidity, making them particularly vulnerable to degradation processes such as water and wind erosion, compaction, acidification, and the impact of radioactive contamination from the Chernobyl disaster. The intensive use of the region's soil cover leads to the activation of degradation processes, disruption of soil structure, and loss of fertility. The deterioration of the soil cover in Zhytomyr region is confirmed by agrochemical survey results. The weighted average humus content in the soil is 2.03 %, which is 1.6 times lower compared to the average value for Ukraine. The availability of essential plant nutrients – potassium (78 mg/kg) and nitrogen (86 mg/kg) – in Zhytomyr oblast soils remains insufficient, while the content of mobile phosphorus compounds (114 mg/kg) is at a sufficient level. An analysis of fertilizer application in agricultural enterprises of Zhytomyr region compared to the previous year shows a 6.3-fold prevalence of organic fertilizers over mineral ones. The main means of crop protection in the region are herbicides (73.1 %) and fungicides and bactericides (20.8 %). However, such intensive use of these substances requires continuous review and adaptation of plant protection strategies, considering ecological risks to minimize negative impacts on the soil cover. The authors propose implementing a comprehensive approach to the preservation

and rational use of soil cover, which includes agrochemical, agrotechnical, anti-erosion, management, and ecological-economic measures aimed at restoring soil fertility and ensuring sustainable land use.

Key words: *soil cover, agricultural lands, land resources, soil degradation, agrochemical status, land protection, rational use.*

Вступ. Земельні ресурси є основою для існування та розвитку суспільства. Грунтовий покрив, як базовий компонент земельних ресурсів, є джерелом отримання продовольства, сировини та енергії, створює необхідні умови для життя людини та підтримує збереження біологічного різноманіття. Сьогодні питання раціонального використання та охорони земель набуває все більшої актуальності, адже є ключовим елементом, що забезпечує стабільність екосистем, продовольчу безпеку та сталий розвиток. Грунтовий покрив України є різноманітним (40 типів і близько 800 ґрунтових видів) та неоднорідним, досить широке поширення мають малопродуктивні, техногенно забруднені та деградовані ґрунти (до 10–15 млн га) [1; 2].

Вивченню агрохімічного стану ґрунтового покриву та раціонального використання земель присвячено досить багато публікацій, які мають важливе теоретичне та практичне значення. Так, у роботі [3] проаналізовано агрохімічне обстеження ґрунтів за останні 15 років та виявлено причини їх незадовільного стану. У публікаціях [4–6] здійснено оцінку розвитку деградаційних процесів у ґрунтах України та запропоновано ряд заходів щодо охорони та відтворення їх родючості. Дослідженням тематики погіршення якісного стану ґрунтового покриву та розвитку процесів ерозійної деградації ґрунтів в сучасних умовах невизначеності присвячено публікації багатьох науковців [7–13]. В Житомирській області питанню вивченню стану ґрунтів, їх родючості, впливу сільськогосподарської діяльності на баланс поживних речовин в ґрунті, причин та наслідків деградації, внесення пестицидів, мінеральних та органічних добрив приділена значна увага, що представлено в роботах дослідників [14–24].

Крім вивчення стану ґрунтів, не менш важливим завданням є їх охорона та раціональне використання, яке направлене на збереження та відновлення родючості, запобігання деградаційним процесам і забезпечення сталого функціонування земельних ресурсів у довгостроковій перспективі. Так, у статті [26] розглядаються шляхи вирішення проблеми ерозії ґрунтів, які базуються на екосистемному підході з акцентом на використання агролісівництва як динамічного та екологічно обґрунтованого методу сталого управління природними ресурсами. У публікаціях [27–30] розглядають аспекти функціонування та перспективи розвитку системи моніторингу земель і ґрунтів в Україні для забезпечення охорони та раціонального використання у сфері управління земельними ресурсами. В роботах [31–33] виокремлюється важливе значення землеустрою як комплексного механізму для управління земельними ресурсами в умовах екологізації землекористування. Ці дослідження є основою для розроблення науково обґрунтованих рекомендацій щодо підвищення ефективності землекористування та забезпечення продовольчої безпеки.

Однак, незважаючи на наявність значного масиву даних в офіційних джерелах та окремих наукових публікаціях, спостерігається дефіцит комплексних аналітичних робіт, які б інтегрували ці розрізнені відомості в єдину систему. Відсутній цілісний аналіз, що пов'язує специфічну структуру землекористування Житомирщини з її унікальними ґрунтово-кліматичними умовами, агрохімічними показниками та просторово диференційованими деградаційними процесами. Саме ця прогалина і визначає актуальність даного дослідження.

Матеріали та методи. Метою статті є проведення комплексного аналітичного огляду сучасного агроекоекологічного стану сільськогосподарських земель Житомирської області шляхом критичного синтезу та інтерпретації наявних офіційних даних для ідентифікації ключових проблем та розробки науково обґрунтованих, регіонально-специфічних напрямів оптимізації землекористування.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що вперше на основі критичного синтезу розрізнених офіційних даних здійснено комплексну оцінку агроекоекологічного стану земель Житомирської області. На основі узагальненої оцінки екологічних проблем землекористування сформульовано практичні рекомендації, адаптовані до регіональних особливостей. Результати дослідження можуть бути використані органами місцевого самоврядування, агропромисловими підприємствами та фермерськими господарствами для розроблення науково обґрунтованих програм раціонального використання та охорони земель, що сприятиме відновленню їх родючості й забезпеченню сталого розвитку регіону.

Дослідження проводилися шляхом збирання інформації з статистичних щорічників щодо земельних ресурсів та ґрунтів, екологічних паспортів області, регіональних доповідей про стан навколишнього середовища, опрацювання літературних джерел, інтернет-ресурсів та розробки пропозицій щодо збереження та відновлення ґрунтового покриву в сучасних умовах. В ході дослідження ми використовували методи аналізу, систематизації, порівняння та узагальнення.

Результати досліджень. Земельний фонд Житомирської області станом на 01.01.2024 р. становить 2982,7 тис. га [34; 35] та має строкатий розподіл земель за цільовим призначенням (рис. 1). Основну частку земельного фонду становлять сільськогосподарські землі 41,7 % (1244,3 тис. га), землі лісогосподарського призначення є на 196,2 тис. га меншими порівняно з сільськогосподарськими. Площа земель природоохоронного та водного фонду становить 20,1 та 10,9 тис. га відповідно, а загальна площа земель оздоровчого та рекреаційного призначення не перевищує 0,3 тис. га (0,01 %).

Оскільки основна маса земель Житомирської області використовується для сільськогосподарських потреб,

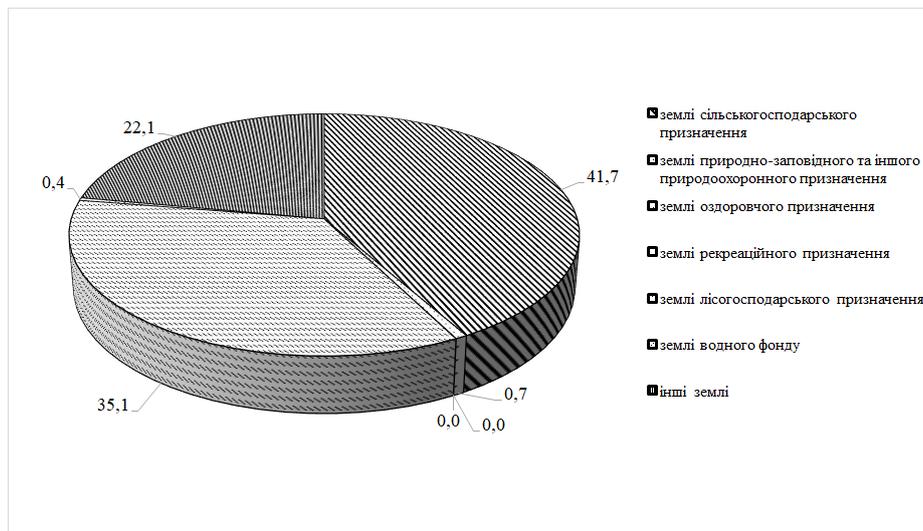


Рис. 1. Розподіл земель за цільовим призначенням в Житомирській області, % [34]

саме це стає однією з базових причин виникнення екологічних проблем ґрунтового покриву регіону.

Загальна площа земель, яка використовується під сільськогосподарські угіддя становить 1510,1 тис. га, що становить понад 50,0 % земельного фонду області [34; 35]. Аналіз розподілу сільськогосподарських угідь за використанням (рис. 2) свідчить, що майже 74,0 % угідь припадає на рілля. Такий високий антропогенний тиск на ґрунти спричиняє руйнування його структури, зниження вмісту гумусу, виникнення ерозії та застосування хімічних меліорантів. Для порівняння частка багаторічних насаджень та перелогів, які сприяють відновленню ґрунту, накопиченню гумусу та мінімізують ерозію становить лише 1,5 % та 4,1 % відповідно. Площа сільськогосподарських угідь, які зайняті під сіножаті та пасовища становить 311,9 тис. га (20,6 %) та за правильного господарського використання може сприяти збереженню біологічного різноманіття, вуглецевому балансу та зменшенню ерозії завдяки постійній рослинності. Отож, можна відмітити, що такий розподіл сільськогосподарських угідь веде до нераціональ-

ного землекористування в Житомирській області, що підвищує деградацію ґрунтів, втрату родючості та екологічну нестабільність агроландшафтів.

Структура ґрунтового покриву Житомирської області зумовлена геологічною будовою Українського кристалічного щита, здебільшого рівнинним рельєфом місцевості, особливостями формування льодовикових та водно-льодовикових відкладів південно-польського та дніпровського періодів зледеніння й відкладами четвертинного періоду пов'язаного з антропогенною діяльністю. Близьке залягання кристалічних порід до поверхні землі зумовлює розвиток процесів заболочування, які уповільнюють ґрунтоутворення на Поліссі. У результаті в низинах формуються торф'яники та торф'яно-болотні ґрунти. На підвищених ділянках місцевості, а також на територіях із потужним шаром льодовикових відкладів, відбувається формування дерново-підзолистих піщаних і супіщаних ґрунтів (рис. 3) [36]. Нинішній стан ґрунтів сільськогосподарських угідь є досить проблематичним, що зумовлений поширенням наступних явищ: ерозії, зменшення вмісту

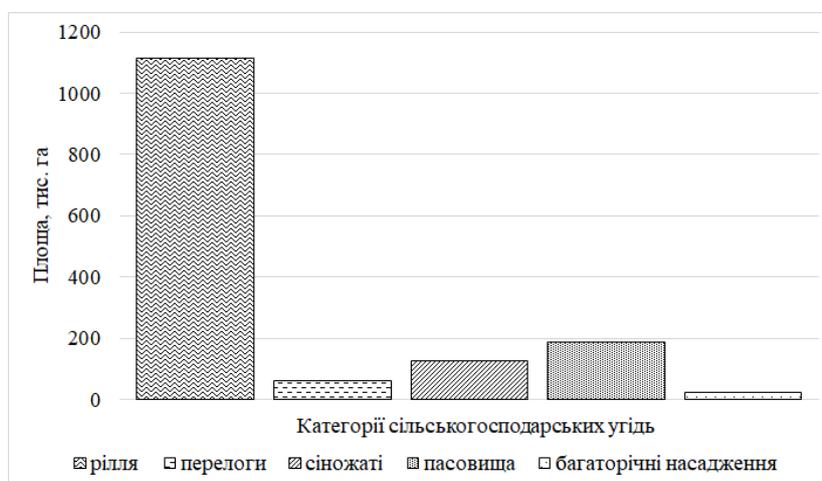


Рис. 2. Розподіл земель сільськогосподарського призначення за угіддями в Житомирській області [34; 35]

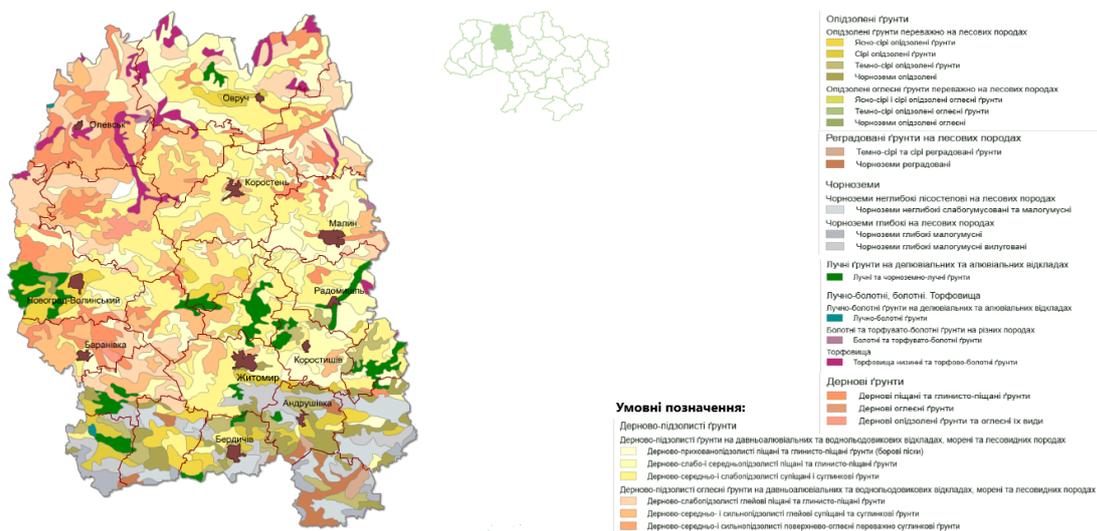


Рис. 3. Карта ґрунтів Житомирської області [36]

гумусу, засоленням, закисленням, ущільненням та внесенням меліорантів.

У Житомирській області за характером поширення основних екзогенних геологічних процесів простежується чітке розмежування між Поліссям і Лісостепом. Це зумовлено сукупністю факторів: геологічною будовою території, особливостями ґрунтоутворення, розподілом атмосферних опадів і рівнем зволоження земель, процесами осадконакопичення, глибиною та обсягами ґрунтових вод, специфікою формування й розподілу річкового стоку, а також наявністю лісових екосистем.

Так, для північних регіонів області характерне підтоплення, що пов'язано з рівнинною територією та характерним стоянням ґрунтових вод. Крім того, в районі підняття Словечансько-Овруцького кряжу в Коростенському районі, відмічено досить інтенсивні прояви водної ерозії, еродовані землі займають 13 тис. га. На території Поліської частини області, де переважають піщані та супіщані ґрунти (колишній Малинський район) досить інтенсивно відмічено прояви вітрової ерозії. Для Лісостепової частини області (Бердичів-

ський район) характерною є площинна ерозія (рис. 4). Також варто відмітити, що 63 тис. га сільськогосподарських угідь розташовано на схилах, з яких 66 % займають пологі схили, майже 30 % схили крутизною 3–5° та 14 % схили крутизною понад 7°. На території Житомирської області відмічено 6,65 тис. га деградованих, 19,9 тис. га малопродуктивних та 29,95 тис. га техногенно забруднених земель [34].

Деградація земель також спричинена наслідками аварії на Чорнобильській АЕС. За результатами досліджень [37] встановлено, що частка ріллі забрудненої ¹³⁷Cs зі щільністю понад 37 кБк/м² становить 103,0 тис. га від її загальної площі, з якої забруднено від 37 до 185 кБк/м² – 97,2 тис. га і від 185 до 555 кБк/м² – 5,8 тис. га. У діапазоні радіоактивного забруднення сільськогосподарських угідь ⁹⁰Sr від 0,74 до 5,55 кБк/м² знаходиться основна частина території області з площею 729,0 тис. га. У зв'язку з цим на цих територіях обмежувалося ведення сільськогосподарського використання або вводилася регламентація використання земель з подальшим здійсненням радіоекологічного аналізу

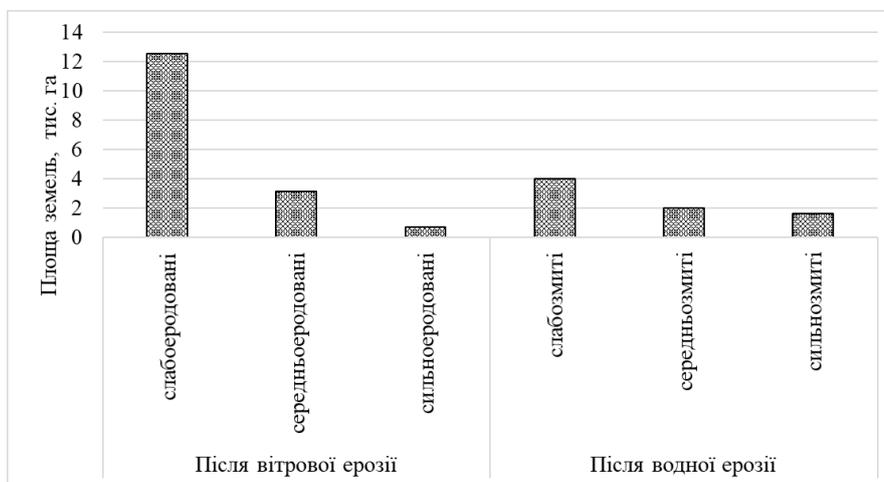


Рис. 4. Площа ерозійно-небезпечних ґрунтів зони Полісся [34]

отриманої продукції. В сучасних умовах важливу роль в накопиченні продукцією радіонуклідів відіграє ґрунтово-поглинальний комплекс. Ґрунти з високою здатністю поглинання (чорноземи, сірі лісові) і важким гранулометричним складом зв'язують радіонукліди міцніше, ніж бідні за органічною речовиною, легкі кислі ґрунти (дерново-підзолисті супіщані і піщані), що впливає на інтенсивність переходу радіонуклідів з ґрунту в рослини.

Погіршення стану ґрунтового покриву підтверджується результатами агрохімічних обстежень. Результати вивчення родючості ґрунту за вмістом гумусу в Жито-

мирській області (рис. 5) свідчать, що середньозважений показник становить 2,03 %, тоді як середнє по Україні є вищим і становить майже 3,2 %. Отже для області характерний низький рівень родючості ґрунтів, що пов'язано з природними особливостями регіону, значною часткою піщаних і супіщаних ґрунтів, та інтенсивним сільськогосподарським використанням.

Проаналізовано дані [35], щодо вмісту в ґрунті основних елементів, необхідних для росту та розвитку рослин: азоту, фосфору та калію. Середньозважений показник вмісту азоту, що легко гідролізується в ґрунті становить 86 мг/кг (рис. 6), що за класифіка-

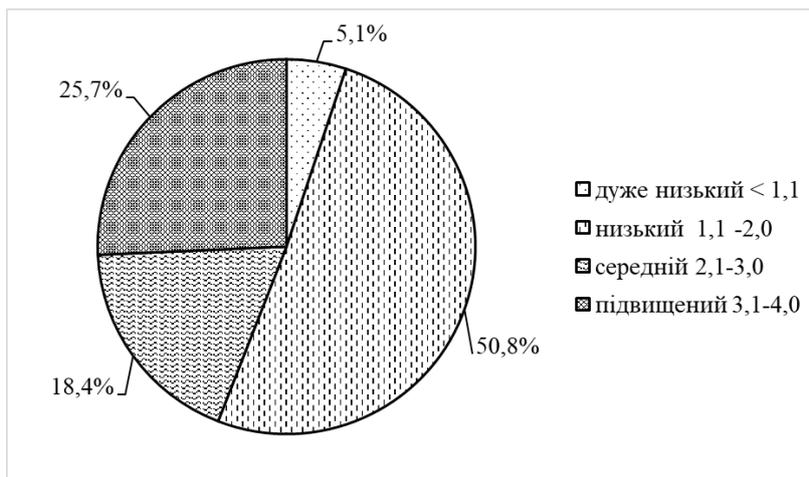


Рис. 5. Розподіл площ обстежених сільськогосподарських угідь за вмістом гумусу,% [35]

цією Тюрніним-Коновою можна віднести до низького рівня забезпеченості азотом ґрунту, що обмежує продуктивність сільськогосподарських культур та вимагає внесення азотних добрив. Для порівняння середньозважений показник по території України становить 110,3 мг/кг, що також є недостатньо високим.

Середньозважений показник вмісту рухомих сполук фосфору (рис. 7) та калію (рис. 8) у ґрунтах Житомир-

ської області становлять 114 мг/кг та 78 мг/кг відповідно. Необхідно відмітити, що вміст фосфору в ґрунті є достатнім і навіть вищим, ніж порівняно із середнім показником по країні. Вміст калію в ґрунтах є низьким, що свідчить про його дефіцит, тоді як середній показник по Україні становить 94-117 мг/кг.

Отже, для нормального росту та розвитку рослин в Житомирській області необхідно застосовувати комп-

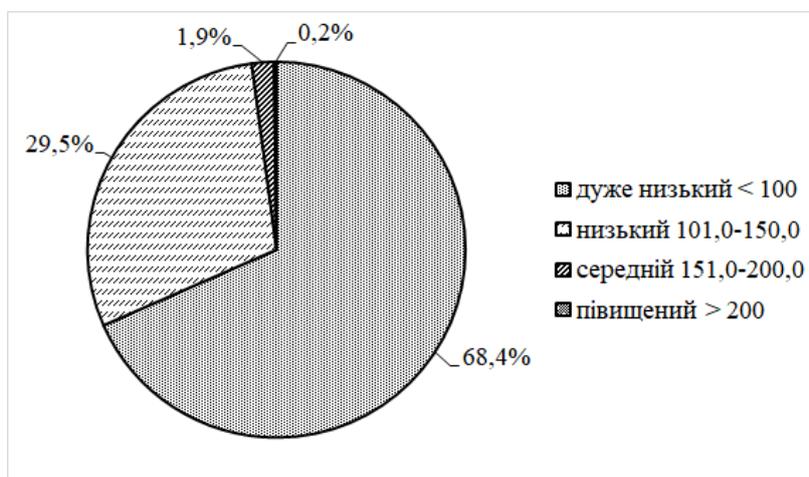


Рис. 6. Розподіл площ обстежених сільськогосподарських угідь за вмістом азоту, що легко гідролізується,% [35]

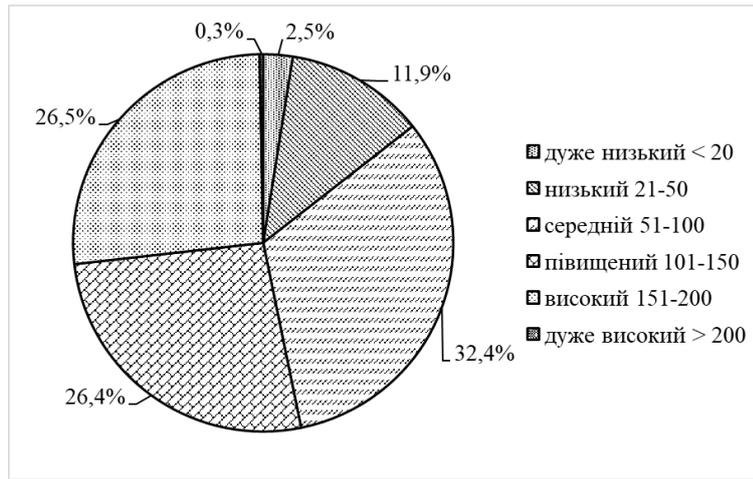


Рис. 7. Розподіл площ обстежених сільськогосподарських угідь за вмістом рухомих сполук фосфору, % [35]

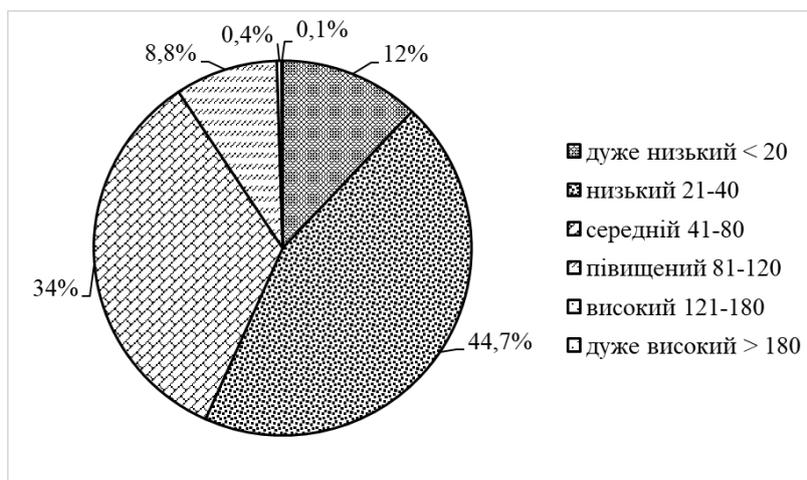


Рис. 8. Розподіл площ обстежених сільськогосподарських угідь за вмістом рухомих сполук калію, % [35]

лексний підхід щодо збалансування вмісту азоту-фосфору-калію шляхом внесення органічних та мінеральних добрив, дотримання сівозміни та оптимізації кислотності ґрунтів.

Аналіз застосування добрив під урожай сільськогосподарських культур 2023 року по підприємствах області (рис. 9) свідчить, що переважає внесення органічних добрив над мінеральними у 6,3 рази.

Всього в 2023 році під урожай було внесено 324601 т органічних добрив та характеризувалися наступним розподілом: гній с/г тварин (67,5 %), послід птиці (3,8 %), торф (0,01%) та інші органічні добрива (28,7 %). Вивчення внесення мінеральних добрив під урожай свідчить, що понад 68,0 % було внесених азотних добрив, а частка внесення калійних та фосфорних не перевищувала 16,0 %.

Під урожай сільськогосподарських культур в Житомирській області протягом 2023 року було внесено 855082 кг пестицидів (у діючій речовині) (рис. 10), що в 1,2 рази більше порівняно з 2022 роком. Аналіз застосування пестицидів демонструє перевагу гербіцидів над іншими, що свідчить про направленість господарств на

боротьбу з бур'янами. Частка використання фунгіцидів і бактерицидів є досить значною – 20,8 %, це вказує на поширеність хвороб в регіоні. Збалансування застосування пестицидів із використанням біологічних методів захисту, сівозмін і агротехнічних прийомів допоможе знизити хімічне навантаження на екосистеми та зменшити ризики для здоров'я населення.

Важливими напрямками підвищення ефективності використання та збереження ґрунтового покриву є необхідність застосування комплексного підходу:

1. Розвиток агрохімічних та агротехнічних заходів для збереження родючості ґрунтів шляхом:

- розвитку виробництва та внесення органічних добрив: використання відходів тваринництва на фермах Бердичівського та Андрушівського районів для отримання компостів та біогумусу;
- ширшого застосування сидеральних культур (гірчиця, фацелія, люпин) – наприклад, у господарствах Олевського району, де піщані ґрунти потребують поліпшення структури та накопичення органічної маси;
- впровадження ґрунтозахисних технологій: у Радомишльському районі вже випробовуються сис-

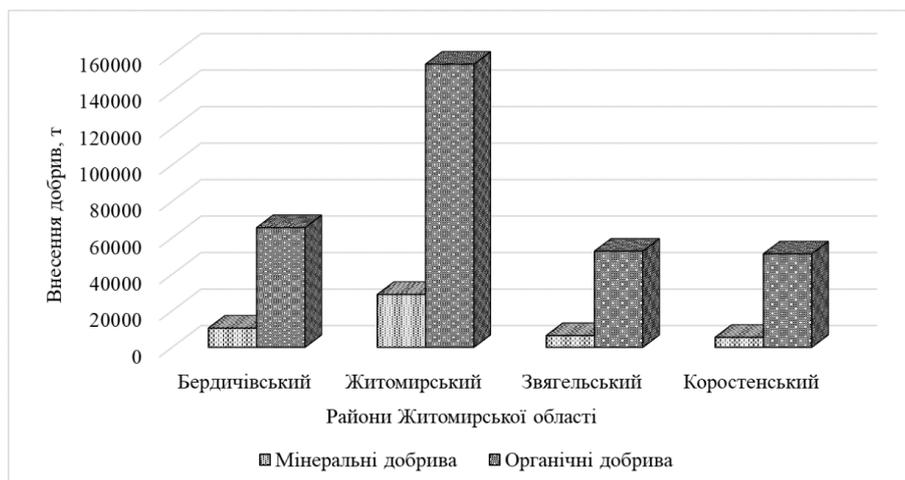


Рис. 9. Застосування мінеральних і органічних добрив під урожай сільськогосподарських культур 2023 року у підприємствах по районах [38]

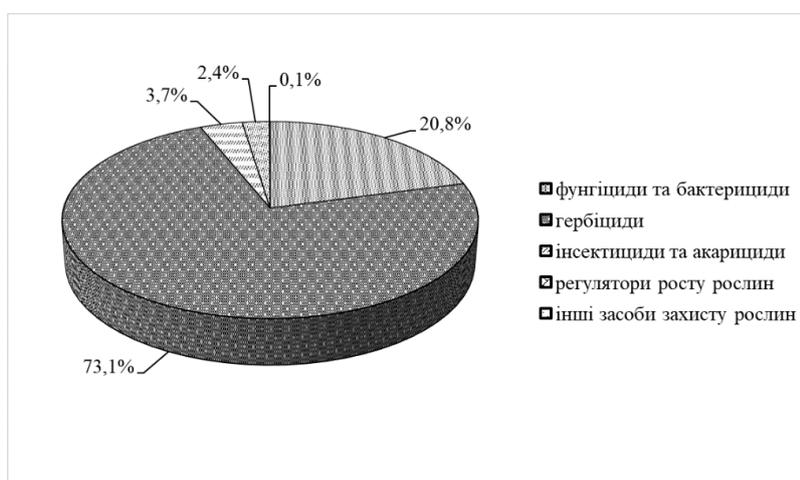


Рис. 10. Застосування пестицидів під урожай сільськогосподарських культур у 2023 році по підприємствах Житомирської області [38]

теми мінімального обробітку, що зменшують ризик ерозії на схилах;

- вдосконалення меліорації: на Поліссі необхідна модернізація старих осушувальних систем (Овруцький, Лугинський райони), а на півдні області (Ружинський, Попільнянський райони) актуальне створення сучасних зрошувальних мереж для боротьби з літніми посухами;

- оптимізації сівозмін – наприклад, у поєднанні картоплі та жита з бобовими культурами (люпин, горох) для збагачення ґрунту азотом;

- створення регіональної системи агрохімічного сервісу для контролю за кислотністю ґрунтів (наприклад, у північних районах області до 60% ґрунтів мають підвищену кислотність, що потребує вапнування);

2. Розробка та впровадження комплексу протиерозійних заходів:

- відновлення системи лісосмуг – у Коростишівському та Малинському районах спостерігається зниження їхньої ефективності через вирубування та старіння деревостанів;

- створення трав'яних смуг та залуження схилових земель, наприклад у південній частині Житомирського району, де ерозійні процеси особливо інтенсивні;

- консервація малопродуктивних піщаних земель на Олевщині шляхом висіву багаторічних трав (тимофійка, конюшина).

3. Створення управлінських та економічних важелів:

- розгортання регіональної системи моніторингу ґрунтів, що враховуватиме проблеми дегуміфікації (у Звягельському районі вміст гумусу в окремих ґрунтах знизився до 1,5–2%);

- рекультивація земель, порушених видобутком бурштину (Олевський, Овруцький райони) через висадку сосни, берези та застосування фіторемедіаційних культур (верба, тополя);

- запровадження місцевих дотацій для фермерів, що застосовують нульовий обробіток чи вирощують сидерати;

– підтримка наукових досліджень та просвітницька робота щодо збереження ґрунтів та їх раціонального використання.

Реалізація комплексного підходу, що поєднує вище зазначені заходи, дає змогу не лише запобігти подальшій деградації ґрунтів, а й поступово відновити їх продуктивність та базується на координації державних органів влади, наукових установ та сільськогосподарських підприємств.

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що першопрчиною прискореної дегуміфікації та посилення ерозійних процесів в Житомирській області є надвисока розораність (74%) та природна вразливість домінуючих дерново-підзолистих ґрунтів, що визначає агроекологічну нестабільність ґрунтового покриву. Для сільськогосподарських ґрунтів Житомирської області

спостерігається дисбаланс у вмісті поживних елементів. Так, на фоні активного внесення азотних добрив часто ігнорується дефіцит калію та інших важливих макро- й мікроелементів. Це призводить до зниження ефективності живлення рослин, втрат врожайності та нераціонального використання інвестицій у добрива, а також створює додаткові екологічні ризики. Процеси деградації ґрунтів у Житомирській області мають просторово диференційований характер, що унеможливає застосування єдиних підходів. Необхідне застосування комплексних програм та заходів, які спрямовані на вирішення конкретних проблем: боротьбу з водною ерозією на Словечансько-Овруцькому краї, протидію дефляції на північних піщаних землях та мінімізацію радіологічних ризиків у районах, що постраждали від Чорнобильської катастрофи.

Література:

1. Національна доповідь про стан родючості ґрунтів України. К.: ТОВ «ВИК-ПРИНТ», 2010. 111 с.
2. Балюк С. А. Ґрунтові ресурси України: стан і заходи їх поліпшення. *Вісник аграрної науки*. 2010. № 6. С. 5–10.
3. Корчинська О. А. Сучасний стан і проблеми відтворення родючості ґрунтів в Україні. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2005. Вип. 2. С. 102–109.
4. Балюк С. А., Медведєв В. В., Воротинцева Л. І., Шимель В. В. Сучасні проблеми деградації ґрунтів і заходи щодо досягнення нейтрального її рівня. *Вісник аграрної науки*. 2017. Т. 95. № 8. С. 5–11. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201708-01>
5. Балюк С. А., Носко Б. С., Скрильник Є. В. Сучасні проблеми біологічної деградації чорноземів і способи збереження їх родючості. *Вісник аграрної науки*. 2016. Т. 94. № 1. С. 11–17. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201601-02>
6. Балюк С. А., Медведєв В. В., Мірошніченко М. М., Скрильник Є. В., Тимченко Д. О., Фатєєв А. І., Христенко А. О., Цапко Ю. Л. Екологічний стан ґрунтів України. *Український географічний журнал*. 2012. № 2. С. 38–42.
7. Тараріко О. Г., Кучма Т. Л., Ільєнко Т. В., Дем'янюк О. С. Ерозійна деградація ґрунтів України за впливу змін клімату. *Агроекологічний журнал*. 2017. № 1. С. 7–15.
8. Стойко Н., Стадницька О. Антропогенні чинники розвитку ерозійних процесів у Львівській області. *Аграрна економіка*. 2017. Т. 10, № 1–2. С. 94–99.
9. Стойко Н. Є. Організація використання земель в ерозійно небезпечних ландшафтах : монографія. Львів : Укр. технології, 2005. 144 с.
10. Тараріко О. Г., Ільєнко Т. В., Кучма Т. Л., Білокін О. А. Ерозія ґрунтів як чинник опустелювання агроландшафтів України. *Агроекологічний журнал*. 2021. № 3. С. 6–21. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2021.240316>
11. Пічуря В. І., Потравка Л. О., Дудяк Н. В., Рутта О. В. Моделювання водно-дефляційної деструкції степових ґрунтів України. *Екологічні науки : науково-практичний журнал*. 2022. № 5(44). С. 121–129. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.17>
12. Чайка Т. О., Яснолоб І. О., Горб О. О., Лотиш І. І., Березницький Є. В. Екологізація систем обробітку ґрунту задля відновлення та підвищення родючості ґрунтів. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2019. № 3. С. 92–102. DOI: <https://doi.org/10.31210/visnyk2019.03.12>
13. Бережняк Є. М., Наумовська О. І., Бережняк М. Ф. Деградаційні процеси в ґрунтах України та їх негативні наслідки для довкілля. *Біологічні системи: теорія та інновації*. 2022. Вип. 13. № 3-4. С. 96–109. DOI: [https://doi.org/10.31548/biologiya13\(3-4\).2022.014](https://doi.org/10.31548/biologiya13(3-4).2022.014)
14. Вишневецький Ф. О., Паламарчук Р. П., Довбиш Л. Л., Залевський Р. А. Динаміка вмісту гумусу в ґрунтовому покриві орних земель Андрушівського району Житомирської області. *Агроекологічний журнал*. 2018. № 2. С. 44–49.
15. Карась І. Ф., Піциль А. О. Вплив сільськогосподарської діяльності на баланс поживних речовин у ґрунтах Житомирської області. *Збалансоване природокористування*. 2020. № 1. С. 129–138. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2020.203942>
16. Присяжнюк І. В., Мельниченко Р. К. Результати аналізу вмісту пестицидів у воді, ґрунті, сільськогосподарській продукції Житомирщини. *Біологічні дослідження*. Збірник наукових праць. Житомир: ПП «Рута», 2018. С. 368–370.
17. Мельничук А. О., Савчук О. І., Дребот О. В. Раціональне використання ґрунтового покриву Житомирської області на засадах адаптивно-ландшафтного землекористування. *Сучасний стан і перспективи ефективного використання земельних ресурсів Житомирської області*. Збірник статей науково-практичної конференції, м. Житомир, 20-21 січня 2016 року. Житомир Вид-во ЖДУ ім. І. Франка. С. 130–136.
18. Кравчук М. М., Буткус В. В. Оцінювання агроекологічного стану ґрунтів Житомирського Полісся як базису для розвитку органічного виробництва в регіоні. Збірник тез II Всеукраїнської науково-практичної конференції «Органічне агровиробництво: освіта і наука», м. Київ, 31 жовтня 2019 року. Науково-методичний центр ВФПО. Київ, 2019. С. 134–137.
19. Костюк В. С. Стан та причини деградації ґрунтів у Житомирській області. Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «Практичні та теоретичні питання розвитку науки та освіти». 2020. С. 6–8.

20. Ковалевський С. Б., Марчук Ю. М., Маєвський К. В., Курдюк О. М. Бурштин на території Українського Полісся: утворення, видобуток, наслідки. *Лісове і садово-паркове господарство*. 2017. № 13. С. 18–32.
21. Легенька Т. П. Причини деградації ґрунтів Житомирської області та шляхи відновлення їх продуктивності. *Вісник ЖНАЕУ*. 2009. № 2. С. 376–383.
22. Макаренко В. В., Матвієнко Б. Я. Вплив антропогенного навантаження на стан родючості ґрунтів на прикладі Коростенського району Житомирської області. *Молодий вчений*. 2016. № 5 (32). С. 314–317.
23. Яцук І. П. Аналіз агроекологічного стану ґрунтів Житомирської області за допомогою методики еколого-агрохімічної паспортизації. *Збалансоване природокористування*. 2014. № 2. С. 107–110.
24. Вишневський Ф. О., Паламарчук Р. П., Ковальова С. П. Динаміка вмісту гумусу в ґрунтового покриві орних земель Новоград-Волинського району Житомирської області. *Агропромислове виробництво Полісся*. 2015. Вип. 8. С. 21–23.
25. Січка У. О. Агроекологічна оцінка заходів охорони родючості ґрунтів на прикладі Житомирської області. *Управління та раціональне використання земельних ресурсів в територіальних громадах у повоєнний період: Матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції (07 березня 2024 року)*. Херсон: ХДАЕУ, 2024. С. 189–192.
26. Стойко Н. Екосистемний підхід до вирішення проблеми ерозії ґрунтів в Україні. *Аграрна економіка*. 2020. Т. 13. № 1-2. С. 29–38. DOI: <https://doi.org/10.31734/agragecon2020>
27. Панас Р., Маланчук М. Сучасні проблеми здійснення моніторингу ґрунтового покриву України. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2013. Вип. 78. С. 201–205.
28. Величко В. А., Мартин А. Г., Новаковська І. О. Моніторинг ґрунтів України – проблеми землевпорядного, ґрунтознавчого та наукового забезпечення. *Вісник аграрної науки*. 2020. № 7 (808). С. 5–16. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202007-01>
29. Шарапова С. В., Кашкіна В. А. Сучасний стан та напрями розвитку системи моніторингу земель і ґрунтів в Україні. *Аналітично-порівняльне правознавство*. 2025. Т. 2. № 3. С. 39–43. DOI: <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2025.03.2.5>
30. Дмитрук Ю. М., Семенчук В. Г. Моніторинг і збереження ґрунтів як компонент системи сталого управління агроекосистемами локального рівня. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. тем. наук. збірник. 2021. Вип. 92. Харків: ННЦ «ІГА ім. О.Н. Соколовського». С. 24–31.
31. Герасимчук О. Л., Мельник-Шамрай В. В., Шевчук Л. М., Васильєва Л. А. Інноваційні підходи до розвитку землеустрою в контексті сталого розвитку територій. *Екологічні науки : науково-практичний журнал*. 2024. № 4(55). С.202–206. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.33>
32. Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В. І., Пацева І. Г., Пацев І. С. Землеустрій як інструмент управління земельними ресурсами в умовах екологізації землекористування. *Екологічні науки : науково-практичний журнал*. 2023. № 6(51). С.78–83. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.12>
33. Герасимчук О. Л., Шевчук Л. М., Васильєва Л. А., Кагукіна А. М. Сучасні підходи до управління та відновлення деградованих земель через інноваційні інструменти землеустрою. *Екологічні науки : науково-практичний журнал*. 2025. № 3(60). С. 56–60. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.10>
34. Регіональна доповіді про стан навколишнього природного середовища Житомирської області у 2023 році. URL: <https://surl.li/lzqeqd> (дата звернення 01.06.2025 р.).
35. Екологічний паспорт Житомирської області. URL: <https://surl.cc/ysrkaz> (дата звернення 01.06.2025 р.).
36. Карта ґрунтів Житомирської області. URL: <https://geomap.land.kiev.ua/obl-5.html> (дата звернення 01.06.2025 р.).
37. Дейсан М. М., Дідківський М. П., Данкевич Є. М. та ін.. Рекомендації по веденню сільськогосподарського виробництва в умовах радіоактивного забруднення північних районів Житомирщини, постраждалих у результаті аварії на Чорнобильській АЕС на період 2011–2016 рр. Житомир: Ін-т сільського госп-ва Полісся НААН України, 2011. 34 с.
38. Довкілля Житомирської області 2023. Головне управління статистики у Житомирській області. URL: <http://www.zt.ukrstat.gov.ua> (дата звернення 01.06.2025 р.).

References:

1. Natsionalna dopovid pro stan rodiuchosti gruntiv Ukrainy [National Report on the State of Soil Fertility in Ukraine]. (2010). Kyiv: VYK-PRINT LLC, 111. [in Ukrainian].
2. Baliuk, S. A. (2010) Gruntovi resursy Ukrainy: stan i zakhody yikh polipshennia [Soil resources of Ukraine: state and measures for their improvement]. *Visnyk ahrarnoi nauky – Bulletin of Agrarian Science*, 6, 5–10. [in Ukrainian].
3. Korchynska, O.A. (2005). Suchasnyi stan i problemy vidtvorennia rodiuchosti gruntiv v Ukraini [Current status and problems of soil fertility restoration in Ukraine]. *Visnyk ahrarnoi nauky Prychornomor'ia – Bulletin of agricultural science of the Black Sea region*, 2, 102–109. [in Ukrainian].
4. Baliuk, S.A., Medvedev, V.V., Vorotyntseva, L.I., Shymel, V.V. (2017). Suchasni problemy dehradatsii gruntiv i zakhody shchodo dosiahnennia neitralnoho yii rivnia [Problems of degradation of soils and measures on reaching its neutral level]. *Visnyk ahrarnoi nauky – Bulletin of Agricultural Science*, 95(8), 5–11. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201708-01>
5. Baliuk, S.A. Nosko, B.S., Skrylnyk, Ye.V. (2016). Suchasni problemy biolohichnoi dehradatsii chornozemiv i sposoby zberezhennia yikh rodiuchosti [Modern problems of biological degradation of black earth and ways of preserving their fertility]. *Visnyk ahrarnoi nauky – Bulletin of Agricultural Science*, 94(1), 11–17. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201601-02>
6. Baliuk, S. A., Medvediev, V. V., Mirosnychenko, M. M., Skrylnyk, Ye.V., Tymchenko, D. O., Fatieiev, A.I., Khrystenko A.O., Tsapko, Yu. L. (2012). Ekolohichnyi stan gruntiv Ukrainy [Environmental state of soils in Ukraine]. *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal – Ukrainian Geographical Journal*, 2, 38–42. [in Ukrainian].

7. Tarariko, O.H., Kuchma, T.L., Iliencko, T.V., Demianiuk, O.S. (2017). Eroziina dehradatsiia gruntiv Ukrainy za vplyvu zmin klimatu [Erosive degradation of Ukrainian soils under the influence of climate change]. *Ahroekologichnyi zhurnal – Agroecological Journal*, 1, 7–15. [in Ukrainian].
8. Stoiko, N., Stadnytska, O. (2017). Antropohenni chynnyky rozvytku eroziinykh protsesiv u Lvivskii oblasti [Anthropogenic factors, effecting development of erosion processes in Lviv region]. *Ahrarna ekonomika – Agrarian Economy*, 10(1–2), 94–99. [in Ukrainian].
9. Stoiko, N. Ye. (2005). Orhanizatsiia vykorystannia zemel v eroziino nebezpechnykh landshaftakh : monohrafiia [Organization of land use in erosion-prone landscapes: monograph]. Lviv : Ukr. tekhnolohii, 144. [in Ukrainian].
10. Tarariko, O.H., Iliencko, T.V., Kuchma, T.L., Bilokin, O.A. (2021) Eroziia gruntiv yak chynnyk opusteliuvannia ahrolandshtiv Ukrainy [Soil erosion as a factor of desertification of agrolandscapes in Ukraine]. *Ahroekologichnyi zhurnal – Agroecological journal*, 3, 6–21. [in Ukrainian].
11. Pichura, V. I., Potravka, L. O., Dudiak, N. V., Rutta, O. V. (2022). Modeliuvannia vodno-defliatsiinoi destrukttsii stepovykh gruntiv Ukrainy [Modeling of water deflation destruction of steppe soils of Ukraine]. *Ekologichni nauky : nauko-vo-praktychnyi zhurnal – Ecological Sciences: Scientific and Practical Journal*, 5(44), 121–129. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.17>
12. Chaika, T. O., Yasnolob, I. O., Horb, O. O., Lotysh, I. I., Bereznytskyi, Ye. V. (2019). Ekolohizatsiia system obrobitku gruntu zadlia vidnovlennia ta pidvyshchennia rodiuchosti gruntiv [Eco-balance of soil tillage systems to restore and increase soil fertility]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii – Bulletin of Poltava state agrarian academy*, 3, 92–102. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.31210/visnyk2019.03.12>
13. Berezniak, Ye. M., Naumovska, O. I., Berezniak, M. F. (2022). Dehradatsiini protsesy v gruntakh Ukrainy ta yikh nehatyvni naslidky dlia dovkillia [Degradation processes in the soils of Ukraine and their negative consequences for the environment]. *Biologichni systemy: teoriia ta innovatsii – Biological Systems: Theory and Innovation*, 13(3-4), 96–109. [in Ukrainian]. DOI: [https://doi.org/10.31548/biologiya13\(3-4\).2022.014](https://doi.org/10.31548/biologiya13(3-4).2022.014)
14. Vyshnevskiy, F.O., Palamarchuk, R. P., Dovbysh, L. L., Zalevskiy, R. A. (2018). Dynamika vmistu humusu v gruntovomu pokryvi omykh zemel Andrushivskoho raionu Zhytomyrskoi oblasti [Dynamics of humus content in the soil cover of arable lands of Andrushivskiy district, Zhytomyr region]. *Ahroekologichnyi zhurnal – Agroecological journal*, 2, 44–49. [in Ukrainian].
15. Karas, I.F., Pitsil, A.O. (2020). Vplyv silkohospodarskoi diialnosti na balans pozhyvnykh rehovyn u gruntakh Zhytomyrskoi oblasti [The impact of agricultural activity on the balance of nutritional substances in soils of Zhytomir region]. *Zbalansovane pryrodokorystuvannia – Balanced nature management*, 1, 129–138. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2020.203942>
16. Prysiazhniuk, I. V., Melnychenko, R. K. (2018). Rezultaty analizu vmistu pestytsydiv u vodi, grunti, silskohospodarskii produktii Zhytomyrshchyny [Results of analysis of pesticide content in water, soil, and agricultural products of Zhytomyr region]. *Biologichni doslidzhennia. Zbirnyk naukovykh prats – Biological research. Collection of scientific papers*. Zhytomyr: PP «Ruta», 368–370. [in Ukrainian].
17. Melnychuk, A.O., Savchuk, O.I., Drebot, O.V. (2016). Ratsionalne vykorystannia gruntovoho pokryvu Zhytomyrskoi oblasti na zasadakh adaptivno-landshaftnoho zemlekorystuvannia [Rational use of soil cover in Zhytomyr region based on adaptive landscape land use]. *Suchasnyi stan i perspektyvy efektyvnoho vykorystannia zemelnykh resursiv Zhytomyrskoi oblasti. Zbirnyk statei nauko-vo-praktychnoi konferentsii, m. Zhytomyr – Current state and prospects for effective use of land resources in Zhytomyr region. Collection of articles of the scientific and practical conference*. Zhytomyr, 130–136. [in Ukrainian].
18. Kravchuk, M.M., Butkus, V.V. (2019). Otsiniuvannia ahroekologichnoho stanu gruntiv Zhytomyrskoho Polissia yak bazysu dlia rozvytku orhanichnoho vyrobnytstva v rehioni [Assessment of the agroecological state of soils of Zhytomyr Polissya as a basis for the development of organic production in the region]. *Zbirnyk tez II Vseukrainskoi nauko-vo-praktychnoi konferentsii «Orhanichne ahrovyrobnytstvo: osvita i nauka» – Collection of abstracts of the II All-Ukrainian scientific and practical conference «Organic agricultural production: education and science»*. Kyiv, 134–137. [in Ukrainian].
19. Kostiuk, V.S. (2020). Stan ta prychny dehradatsii gruntiv u Zhytomyrskii oblasti [The state and causes of soil degradation in Zhytomyr region]. *Materialy II Mizhnarodnoi nauko-vo-praktychnoi konferentsii «Praktychni ta teoretychni pytannia rozvytku nauky ta osvity» – Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference «Practical and Theoretical Issues of the Development of Science and Education»*. Lviv, 6-8. [in Ukrainian].
20. Kovalevskiy, S. B., Marchuk, Yu. M., Maievskiy, K. V., Kurdiuk, O. M. (2017). Burshtyn na terytorii Ukrainskoho Polissia: utvorennia, vydobutok, naslidky [Amber in the Ukrainian Polissya territory: development, exemptions, consequences]. *Lisove i sadovo-parkove hospodarstvo – Forestry and horticulture*. 13, 18–32. [in Ukrainian].
21. Lehenka, T. P. (2009). Prychny dehradatsii gruntiv Zhytomyrskoi oblasti ta shliakhy vidnovlennia yikh produktyvnosti [Causes of soil degradation in Zhytomyr region and ways to restore their productivity]. *Visnyk ZhNAEU – Bulletin of Zhytomyr Agroecological National University*, 2, 376–383. [in Ukrainian].
22. Makarenko, V.V., Matviienko, B.Ya. (2016). Vplyv antropohennoho navantazhennia na stan rodiuchosti gruntiv na prykladi Korostenskoho raionu Zhytomyrskoi oblasti [Anthropogenic load effect on condition of soil fertility in Korostensky region Zhitomir region]. *Molodyi vchenyi – Young Scientist*, 5 (32), 314–317. [in Ukrainian].
23. Yatsuk, I.P. (2014). Analiz ahroekologichnoho stanu gruntiv Zhytomyrskoi oblasti za dopomohoiu metodyky ekoloho-ahrokhimichnoi pasportyzatsii [Analysis of the agroecological state of soils of Zhytomyr region using the methodology of ecological and agrochemical certification]. *Zbalansovane pryrodokorystuvannia – Balanced nature management*, 2, 107–110. [in Ukrainian].
24. Vyshnevskiy, F. O., Palamarchuk, R. P., Kovalova, S. P. (2015). Dynamika vmistu humusu v gruntovomu pokryvi omykh zemel Novohrad-Volynskoho raionu Zhytomyrskoi oblasti [Dynamics of humus content in the soil cover of arable lands

of Novograd-Volynskiy district of Zhytomyr region]. *Ahropromyslove vyrobnytstvo Polissia – Agroindustrial production of Polissya*, 8, 21–23. [in Ukrainian].

25. Sichkar, U. O. (2024). Ahroekolohichna otsinka zakhodiv okhorony rodiuchosti gruntiv na prykladi Zhytomyrskoi oblasti [Agroecological assessment of soil fertility protection measures on the example of Zhytomyr region]. *Upravlinnia ta ratsionalne vykorystannia zemelnykh resursiv v terytorialnykh hromadakh u povoiennyi period: Materialy VII Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii – Management and rational use of land resources in territorial communities in the post-war period: Materials of the VII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference*. Kherson, 189–192. [in Ukrainian].

26. Stoiko, N. (2020). Ekosystemnyi pidkhid do vyrishennia problemy erozii gruntiv v Ukraini [Ecosystem approach to solution of the problem of soil erosion in Ukraine]. *Ahrarna ekonomika – Agrarian Economy*, 13(1-2), 29–38. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.31734/agrarecon2020>

27. Panas, R., Malanchuk, M. (2013). Suchasni problemy zdiisnennia monitorynhu gruntovoho pokryvu Ukrainy [Current problems of soil cover monitoring in Ukraine]. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznmannia – Geodesy, cartography and aerial photography*, 78, 201–205. [in Ukrainian].

28. Velychko, V. A., Martyn, A. H., Novakovska, I. O. (2020). Monitorynh gruntiv Ukrainy – problemy zemlevporiadnoho, gruntoznavchoho ta naukovooho zabezpechennia [Soil monitoring in Ukraine – problems of land management, soil science and scientific support]. *Visnyk ahrarnoi nauky – Bulletin of Agricultural Science*, 7(808), 5–16. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202007-01>

29. Sharapova, S.V., Kashkina, V.A. (2025). Suchasnyi stan ta napriamy rozvytku systemy monitorynhu zemel i gruntiv v Ukraini [Current state and directions of development of the land and soil monitoring system in Ukraine]. *Analitichno-porivnialne pravoznavstvo – Analytical and comparative jurisprudence*, 2(3), 39–43. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2025.03.2.5>

30. Dmytruk, Yu.M., Semenchuk, V.H. (2021). Monitorynh i zberezhennia gruntiv yak komponent systemy staloho upravlinnia ahroekosystemamy lokalnoho rivnia [Monitoring and conservation of soils as a component of the system of sustainable management of agroecosystems at the local level]. *Ahrokhimiia i gruntoznavstvo. Mizhvid. tem. nauk. Zbirnyk – Agrochemistry and soil science. Interdisciplinary. thematic. scientific. collection*. Kharkiv, 24–31. [in Ukrainian].

31. Herasymchuk, O.L., Melnyk-Shamrai, V.V., Shevchuk, L.M., Vasilieva, L.A. (2024). Innovatsiini pidkhody do rozvytku zemleustroi v konteksti staloho rozvytku terytorii [Innovative approaches to land development in the context of sustainable territory development]. *Ekolohichni nauky : naukovo-praktychnyi zhurnal – Ecological sciences: scientific and practical journal*, № 4(55), 202–206. [in Ukrainian]. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.33>

32. Melnyk-Shamrai, V.V., Shamrai, V.I., Patseva, I.H., Patsev, I.S. (2023). Zemleustrii yak instrument upravlinnia zemelnymy resursamy v umovakh ekolohizatsii zemlekorystuvannia [Land structure as a land resource management tool in the conditions of ecologization of land use]. *Ekolohichni nauky : naukovo-praktychnyi zhurnal – Ecological sciences: scientific and practical journal*, 6(51), 78–83. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.12>

33. Herasymchuk, O.L., Shevchuk, L.M., Vasilieva, L.A., Kahukina, A.M. (2025). Suchasni pidkhody do upravlinnia ta vidnovlennia dehradovanykh zemel cherez innovatsiini instrumenty zemleustroi [Modern approaches to the management and restoration of degraded lands through innovative land management tools]. *Ekolohichni nauky : naukovo-praktychnyi zhurnal – Ecological sciences: scientific and practical journal*, 3(60), 56–60. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.10>

34. Rehionalnoi dopovidi pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyssha Zhytomyrskoi oblasti u 2023 rotsi (2025). [Regional report on the state of the environment of Zhytomyr region in 2023]. URL: <https://surl.li/lzqegd> [in Ukrainian].

35. Ekolohichniy pasport Zhytomyrskoi oblasti (2025). [Ecological passport of Zhytomyr region]. URL: <https://surl.li/ccysrkaz> [in Ukrainian].

36. Karta gruntiv Zhytomyrskoi oblasti (2025). [Soil map of Zhytomyr region]. URL: <https://geomap.land.kiev.ua/obl-5.html> [in Ukrainian].

37. Deisan, M. M., Didkivskiy, M. P., Dankevych, Ye. M. ta in.. (2011). Rekomendatsii po vedenniu silskohospodarskoho vyrobnytstva v umovakh radioaktyvnoho zabrudnennia pivnichnykh raioniv Zhytomyrshchyny, postrazhdalykh u rezultati avarii na Chornobylskii AES na period 2011–2016 rr [Recommendations for conducting agricultural production in conditions of radioactive contamination of the northern regions of Zhytomyr region affected by the Chernobyl accident for the period 2011–2016]. *Zhytomyr: In-t silskoho hosp-va Polissia NAAN Ukrainy – Zhytomyr: Institute of Agriculture of Polissya NAAS of Ukraine*, 34. [in Ukrainian].

38. Dovkillia Zhytomyrskoi oblasti 2023. (2025). Holovne upravlinnia statystyky u Zhytomyrskii oblasti [Environment of Zhytomyr region 2023. Main Department of Statistics of Zhytomyr region]. URL: <http://www.zt.ukrstat.gov.ua/> [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 29.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025

ВПЛИВ АФЛАТОКСИНУ В1 НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ПЕРЕКИСНОГО ОКИСНЕННЯ ЛІПІДІВ У ТКАНИНАХ КАРАСЯ ЗВИЧАЙНОГО

Симонова Наталія Анатоліївна,

аспірантка кафедри біології
Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-5544-3527>

Мехед Ольга Борисівна,

доктор педагогічних наук, кандидат біологічних наук, професор,
професор кафедри біології
Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9485-9139>
Scopus Author ID: 6506181994
Web of Science Researcher ID: AAC-7333-2021

У сучасній аквакультурі інтенсивне використання рослинних інгредієнтів у кормах для риб істотно підвищує ризик їх контамінації мікотоксинами. Ці вторинні метаболіти мікроскопічних грибів становлять серйозну загрозу для здоров'я гідробіонтів, оскільки можуть накопичуватися у кормовій базі та надходити в організм риб навіть у низьких концентраціях. Серед широкого спектра мікотоксинів особливу небезпеку становить афлатоксин В1 (АФВ1) – один із найбільш токсичних та поширених контамінантів, який вважається потужним гепатотоксином, канцерогеном і імунодепресантом. Його небезпека для рибницьких господарств полягає у здатності порушувати метаболізм, індукувати окислювальний стрес та значно знижувати продуктивність аквакультури.

У проведеному дослідженні встановлено, що афлатоксин В1 індукує інтенсивні процеси перекисного окиснення ліпідів і спричиняє окислювальний стрес у тканинах карася звичайного (*Carassius carassius* (Linnaeus, 1758)). Це проявлялося у статистично значущому підвищенні рівня малонового діальдегіду (МДА) та дієнових кон'югатів у всіх досліджених тканинах експериментальної групи порівняно з контролем. Найбільш виражені зміни спостерігалися у печінці, що підтверджує її ключову роль як органу-мішені для токсичної дії афлатоксину. Водночас у відповідь на підвищене навантаження активних форм кисню відбувалася компенсаторна активація ферментів антиоксидантного захисту. Зокрема, було зафіксовано значне зростання активності супероксиддисмутази (СОД), каталази (КАТ) та глутатіонпероксидази (ГП), що свідчить про мобілізацію природних захисних механізмів організму риб.

Отримані результати доводять, що афлатоксин В1 навіть у низьких концентраціях чинить виражений токсичний вплив на риб, порушуючи окислювально-відновні процеси, змінюючи біохімічний гомеостаз і провокуючи розвиток окислювального стресу. Це підтверджує необхідність комплексного моніторингу стану риб у системах аквакультури, а також впровадження профілактичних стратегій. Одним із найбільш перспективних напрямів є застосування кормових добавок-адсорбентів та антиоксидантних препаратів, здатних знижувати біодоступність афлатоксину і нейтралізувати його негативний вплив. Таким чином, результати дослідження не лише поглиблюють розуміння механізмів дії АФВ1 на організм риб, але й мають практичне значення для підвищення екологічної та харчової безпеки у сучасних рибогосподарських системах.

Ключові слова: афлатоксин В1, аквакультура, карась звичайний, окислювальний стрес, перекисне окиснення ліпідів, антиоксидантні ферменти, малоновий діальдегід, дієнові кон'югати, біохімічні маркери, мікотоксини у кормах.

Symonova Nataliia, Mekhed Olha. Influence of aflatoxin B1 on the intensity of lipid peroxidation in curb tissues

In modern aquaculture, the intensive use of plant ingredients in fish feeds increases the risk of their contamination with mycotoxins. Among these compounds, aflatoxin B1 (AFB1), which is a potent toxicant and is known for its ability to cause oxidative stress, is of particular concern. In view of this, the aim of our work was to investigate the effect of AFB1 on lipid peroxidation processes and the state of antioxidant protection in the tissues of common crucian carp (*Carassius carassius* (Linnaeus, 1758)), an important commercial fish.

The experiment lasted 14 days and was conducted on crucian carp pairs kept in 200-liter aquariums. The fish were divided into two groups: control (without the addition of AFB1) and experimental, which was daily supplemented with AFB1 at a concentration of 1.0 µg/L. After the experiment, biochemical analysis of liver, gill, brain and skeletal muscle tissues was performed. The intensity of lipid peroxidation processes was assessed by the level of end products – malondialdehyde (MDA) and intermediate products – diene conjugates. In addition, the activity of key enzymes of antioxidant defense was measured: superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and glutathione peroxidase (GP).

The results obtained showed that the effect of aflatoxin B1 caused significant oxidative stress in the body of crucian carp. In all studied tissues of the experimental group, a statistically significant increase in the level of MDA and diene conjugates was recorded compared to the control group. The most pronounced changes were observed in the liver, which confirms its role as the main target organ for this toxin. At the same time, in response to the increased level of oxidative stress, compensatory activation of antioxidant defense enzymes occurred in the fish body, which is manifested in a significant increase in the activity of SOD, CAT and GP.

These data indicate that aflatoxin B1, even at low concentrations, has a pronounced toxic effect, disrupting redox processes in the fish body. The results of our study are an important confirmation of the need to develop and implement effective strategies to minimize the negative consequences of aflatoxicosis in aquaculture, which includes the use of feed additives-adsorbents.

Key words: *aflatoxin B1, oxidative stress, lipid peroxidation, antioxidant enzymes, common crucian carp, aquaculture, biochemical markers.*

Вступ. В останні роки світова аквакультура швидко розвивається, що супроводжується інтенсифікацією виробництва та застосуванням нових технологій. Регулярне використання рослинної сировини у кормах для риб супроводжується зростанням ризику їх контамінації мікотоксинами – вторинними метаболітами мікроміцетів, що можуть міститися у такій сировині [1]. Одним із найнебезпечніших для гідробіонтів є афлатоксин В1, що утворюється цвілевими грибами роду *Aspergillus* [2].

Вплив мікотоксинів на здоров'я риб є предметом досліджень [3; 4]. Токсична дія цих сполук пов'язана зі здатністю спричиняти окислювальний стрес, що є однією з головних причин розвитку патологічних процесів в організмі [5]. Перекисне окиснення ліпідів (ПОЛ) є однією з ключових ланок в патогенезі токсичного ураження, що призводить до руйнування біологічних мембран та порушення функціонування клітин [6; 7]. Активність ПОЛ у тканинах риб залежить від ряду чинників, включаючи вид риб, їх фізіологічний стан, а також вид, дозу та тривалість дії токсиканта [8].

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених токсичному впливу мікотоксинів, залишається багато невивчених питань щодо механізмів їхньої дії на біохімічні процеси в організмі риб. Особливо актуальним є дослідження впливу на водні організми афлатоксину В1, який визнано одним з найбільш небезпечних контамінантів. Детальні механізми порушення процесів перекисного окиснення ліпідів у різних тканинах карася звичайного, який є важливою промисловою рибою, потребують подальшого вивчення.

Метою роботи є вивчення впливу афлатоксину В1 на процеси перекисного окиснення ліпідів у тканинах карася звичайного та оцінка інтенсивності спричиненого ним окислювального стресу.

Матеріали та методи. Дослідження проводили на дворічках карася звичайного (*Carassius carassius* (Linnaeus, 1758)), що були вирощені в умовах аквакультури. Експеримент тривав 14 діб у 200-літрових акваріумах. Риб утримували за стандартних рибоводно-біологічних та гідрохімічних норм, а саме: рН 7,30±0,27, вміст кисню 5,6±0,4 мг/дм³ та температура, що відповідає природній. Маса риби становила 200–300 г.

Дослідження виконано у форматі пілотного експерименту, в якому до кожної групи було включено по 5 особин: контрольна група (КГ) – без додавання афлатоксину В1; експериментальна група (ЕГ) – яким щоденно додавали у воду афлатоксин В1 у концентрації 1,0 мкг/л. Використовували стандартний зразок Т-2 токсину TRILOGY (лот 231205-24145), до 05.2025, умови зберігання згідно паспорту на стандарт при температурі не вище 8°C.

Після закінчення експерименту рибу піддавали евтаназії методом декапітації згідно з етичними прин-

ципами поводження з тваринами [9]. Для аналізу відбирали зразки тканин печінки, зябер, мозку та скелетних м'язів.

Інтенсивність процесів перекисного окиснення ліпідів (ПОЛ) оцінювали за рівнем малонового діальдегіду (МДА) – як кінцевого продукту, та дієнових кон'югатів – як проміжного продукту [7]. Оцінювали активність ключових антиоксидантних ферментів: супероксиддисмутази (СОД), каталази (КАТ) та глутатіонпероксидази (ГП). Визначення активності глутатіонредуктази засноване на вимірюванні швидкості окислення NADPH, реєстрували спектрофотометрично по зменшенню оптичної густини при довжині хвилі 340 нм [10]. Активність каталази визначали згідно методичних рекомендацій [11]. Визначення активності СОД здійснювали згідно [12] у модифікації [13]. Для розрахунку питомої активності ферментів визначали вміст загального білка в гомогенатах тканин за методом [14].

– Отримані дані обробляли за допомогою програми Statistica 10.0 (StatSoft, США). Для порівняння груп використовували однофакторний дисперсійний аналіз та критерій Стьюдента. Відмінності вважали статистично значущими при $p < 0,05$.

Результати. Отримані результати демонструють, що вплив афлатоксину В1 (АФВ1) у досліджуваній концентрації 1,0 мкг/л на організм карася звичайного спричиняє розвиток вираженого окислювального стресу. Це підтверджується значним підвищенням рівня продуктів перекисного окиснення ліпідів (ПОЛ), зокрема малонового діальдегіду (МДА) та дієнових кон'югатів, а також компенсаторною активацією ключових ферментів антиоксидантного захисту у досліджених тканинах риб (таблиця 1).

Як видно з таблиці 1, вплив афлатоксину В1 призвів до значного зростання рівня продуктів перекисного окиснення ліпідів (МДА та дієнових кон'югатів) у всіх досліджених тканинах експериментальної групи порівняно з контролем. Найбільш виражені зміни спостерігалися у печінці, що є основним органом детоксикації, де рівень МДА зріс більш ніж у 2 рази, а дієнових кон'югатів – також більше ніж у 2 рази.

Аналіз активності антиоксидантних ферментів показав, що в усіх досліджених тканинах спостерігалося їх значне зростання, що є компенсаторною відповіддю організму на підвищений рівень окислювального стресу (таблиця 2).

Отримані результати демонструють, що вплив афлатоксину В1 (АФВ1) у досліджуваній концентрації 1,0 мкг/л на організм карася звичайного спричиняє розвиток вираженого окислювального стресу. Це підтверджується значним підвищенням рівня продуктів перекисного окиснення ліпідів (ПОЛ), зокрема малонового діальдегіду (МДА) та дієнових кон'югатів, а

Вплив афлатоксину В1 на показники перекисного окиснення ліпідів у тканинах карася звичайного (M ± m, n=5)

Тканина	Показник	Контрольна група	Експериментальна група
Печінка	МДА, мкмоль/кг	5,2 ± 0,3	12,8 ± 0,8*
	Дієнові кон'югати, D232 нм/г	0,25 ± 0,02	0,55 ± 0,04*
Зябра	МДА, мкмоль/кг	3,4 ± 0,2	7,1 ± 0,5*
	Дієнові кон'югати, D232 нм/г	0,18 ± 0,01	0,39 ± 0,03*
Мозок	МДА, мкмоль/кг	2,8 ± 0,1	4,2 ± 0,3*
	Дієнові кон'югати, D232 нм/г	0,15 ± 0,01	0,21 ± 0,02*
Скелетні м'язи	МДА, мкмоль/кг	2,1 ± 0,2	3,5 ± 0,2*
	Дієнові кон'югати, D232 нм/г	0,10 ± 0,01	0,16 ± 0,01*

* Різниця є статистично значущою порівняно з контрольною групою (p < 0,05).

Таблиця 2

Активність антиоксидантних ферментів у тканинах карася звичайного під впливом афлатоксину В1 (M ± m, n=5)

Тканина	Показник	Контрольна група	Експериментальна група
Печінка	СОД, Од/мг білка	2,8 ± 0,2	4,5 ± 0,4*
	КАТ, ммоль H ₂ O ₂ /хв*мг білка	1,5 ± 0,1	2,6 ± 0,2*
	ГП, нмоль/хв*мг білка	45 ± 3	68 ± 5*
Зябра	СОД, Од/мг білка	1,8 ± 0,1	2,8 ± 0,2*
	КАТ, ммоль H ₂ O ₂ /хв*мг білка	0,9 ± 0,1	1,3 ± 0,1*
	ГП, нмоль/хв*мг білка	30 ± 2	45 ± 3*
Мозок	СОД, Од/мг білка	1,2 ± 0,1	1,8 ± 0,1*
	КАТ, ммоль H ₂ O ₂ /хв*мг білка	0,6 ± 0,1	0,9 ± 0,1*
	ГП, нмоль/хв*мг білка	22 ± 2	30 ± 2*
Скелетні м'язи	СОД, Од/мг білка	0,9 ± 0,1	1,2 ± 0,1*
	КАТ, ммоль H ₂ O ₂ /хв*мг білка	0,4 ± 0,1	0,6 ± 0,1*
	ГП, нмоль/хв*мг білка	15 ± 1	20 ± 2*

* Різниця є статистично значущою порівняно з контрольною групою (p < 0,05).

також компенсаторною активацією ключових ферментів антиоксидантного захисту у досліджених тканинах риб. Активність СОД, КАТ та ГП у печінці зросла в середньому в 1,5–1,8 рази. Це свідчить про мобілізацію захисних систем для нейтралізації вільних радикалів та зменшення токсичного впливу афлатоксину В1.

Ці результати підтверджують гіпотезу про те, що афлатоксин В1 спричиняє розвиток окислювального стресу, а його токсичний ефект проявляється через порушення ліпідного метаболізму та активацію захисних механізмів в організмі риби.

Ці результати узгоджуються з висновками інших досліджень, що підкреслюють загальносистемний вплив мікотоксинів на водні організми [16]. Зокрема, дослідження на гібридному групери показали, що вплив афлатоксину В1 призводить до порушення метаболізму ліпідів та їх накопичення у печінці, що є прямим наслідком порушення клітинних процесів і розвитку окислювального стресу [17]. Отримані нами дані підтверджують, що печінка, як основний орган детоксикації, найбільш чутлива до впливу токсинів, що проявляється найінтенсивнішими змінами показників ПОЛ у цій тканині.

Крім того, виявлені порушення підтверджують, що мікотоксини, включно з АФВ1, можуть чинити синерге-

тичний ефект, посилюючи патологічний вплив на організм риб при одночасній присутності в середовищі або кормі [18]. Це особливо актуально, оскільки в реальних умовах аквакультури часто спостерігається комбінована контамінація кормів декількома видами мікотоксинів [19; 20].

Враховуючи виявлені порушення, важливим напрямом досліджень є розробка стратегій для пом'якшення негативних наслідків впливу мікотоксинів. Наші результати, що вказують на інтенсивний окислювальний стрес, підтверджують, що одним із ефективних підходів є використання кормових добавок-адсорбентів. Дослідження показали, що такі добавки сприяють зв'язуванню токсинів у шлунково-кишковому тракті риб, зменшуючи їх біодоступність та мінімізуючи негативний вплив на організм [4].

Висновки. Вплив афлатоксину В1 у концентрації 1,0 мкг/л на організм карася звичайного спричиняє розвиток вираженого окислювального стресу, що підтверджується значним зростанням рівня продуктів перекисного окиснення ліпідів (МДА та дієнових кон'югатів) у досліджених тканинах риб. Найбільш чутливою до токсичного впливу афлатоксину В1 виявилася печінка, де спостерігалися найінтенсивніші зміни показників ПОЛ. Це свідчить про те, що печінка є основним орга-

ном-мішенню для цього токсину, що узгоджується з її роллю в метаболізмі та детоксикації. Для компенсації окислювального стресу в організмі риб відбувається активація ферментів антиоксидантного захисту (СОД, КАТ, ГП) у всіх досліджених тканинах. Це є захисною реакцією організму, спрямованою на нейтралізацію вільних радикалів та зменшення руйнівного впливу токсину. Отримані результати підтверджують актуаль-

ність подальших досліджень для розробки ефективних стратегій мінімізації негативних наслідків афлатоксикозу в умовах аквакультури. Обмеженням роботи є невеликий розмір вибірки, що характерно для пілотних досліджень. У подальших експериментах доцільно збільшити кількість особин у групах для підвищення статистичної надійності та репрезентативності результатів.

Література:

1. Bashorun A., Hassan Z. U., Al-Yafei M. A., Jaoua S. Fungal contamination and mycotoxins in aquafeed and tissues of aquaculture fishes and their biological control. *Aquaculture*. 2023. 576. 01–08. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739892>.
2. Battilani P., Toscano P., van der Fels-Klerx H. J., Moretti A., Leggieri Camardo M., Brera, C., et al. Aflatoxin B1 contamination in maize in Europe increases due to climate change. *Scientific Reports*, 2013. 6. 24328. <https://doi.org/10.1038/srep24328>.
3. Полотнянко Л., Мехед О. Накопичення мікотоксинів у м'язах коропа лускатого (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) при згодовуванні корму, контамінованого Т2-токсинам. *Природні ресурси прикордонних територій в умовах зміни клімату*. Чернігів : Десна-Поліграф. 2023. С. 105-106.
4. Gruber-Dorninger C., Müller A., Rosen R. Multi-Mycotoxin Contamination of Aquaculture Feed: A Global Survey. *Toxins*. 2025. Т. 17. № 3. С. 116. <https://doi.org/10.3390/toxins17030116>.
5. Symonova N. A., Mekhed O. B., Kupchyk O. Y., Tretyak O. P. Toxicants in the degradation of lipids in the organism of scaly carp. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2018. 8(4), 6-10.
6. Головчак Н. П., Тарновська А. В., Коцюмбас Г. І., Санагуський Д. І. Процеси перекисного окиснення ліпідів у живих організмах : монографія. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2012. 252 с.
7. Особа І. А. Біологічна роль перекисного окиснення ліпідів у забезпеченні функціонування організму риб. *Рибогосподарська наука України*. 2013. № 1. С. 87–96. URL: <http://www.fishukr.org.ua>.
8. Особа І. А., Грициняк І. І. Активність неферментативної ланки системи антиоксидантного захисту у печінці однорічок лускатих та рамчастих коропів несвицького зонального типу. *Рибогосподарська наука України*. 2010. № 3. С. 62–65. URL: <http://www.fishukr.org.ua>.
9. World Medical Association. World Medical Association Declaration of Helsinki. Ethical principles for medical research involving human subjects. *JAMA*, 2013. 310(20), 2191-2194. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>.
10. Левадна О. В., Донченко Г. В., Валуціна В. М. та ін. Співвідношення між величинами активності ферментів антиоксидантної системи в різних тканинах інтактних шурів. *Український біохімічний журнал*. 1998. Т. 70, № 6. С. 53–58.
11. Ou P., Wolf S. P. Erythrocyte catalase inactivation (H₂O₂ production) by ascorbic acid and glucose in presence of aminotriazole: role of transition metals and relevance to diabetes. *Biochemical Journal*, 1994. 303, 935–940.
12. Доценко О. І., Доценко В. А., Міщенко А. М. Активність супероксиддисмутази і каталази в еритроцитах і деяких тканинах мишей в умовах низькочастотної вібрації. *Фізика живого*. 2010. Т. 18. № 1. С. 107–113.
13. Костюк В. А., Потапович А. І., Ковальова Ж. В. Простий і чутливий метод визначення активності супероксиддисмутази, заснований на реакції окиснення кверцетину. *Питання медичної хімії*. 1990. № 2. С. 88–91.
14. Lowry O., Rosebrough N., Farr A., Randall R. Protein measurement with the Folin phenol reagent. *Journal Biological Chemistry*. 1951. 193. 265–275. [https://www.jbc.org/article/S0021-9258\(19\)52451-6/pdf](https://www.jbc.org/article/S0021-9258(19)52451-6/pdf).
15. Koletsis P., Schrama J.W., Graat E.A.M., Wiegertjes G.F., Lyons P., Pietsch, C. The Occurrence of Mycotoxins in Raw Materials and Fish Feeds in Europe and the Potential Effects of Deoxynivalenol (DON) on the Health and Growth of Farmed Fish Species—A Review. *Toxins*. 2021. Т. 13. № 6. С. 403. <https://doi.org/10.3390/toxins13060403>.
16. Liu H., Xie R., Huang W., Yang Y., Zhou M., Lu B., Li B., Tan B., Dong X. Negative effects of aflatoxin B1 (AFB1) in the diet on growth performance, protein and lipid metabolism, and liver health of juvenile hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* *Epinephelus lanceolatus*). *Aquaculture Reports*. 2023. Т. 33. С. 101779. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101779>.
17. Fornari D.C., Peixoto S., Ksepka S.P., Bullard S.A., Rossi W., Nuzback D.E., Davis D.A. Effects of dietary mycotoxins and mycotoxin adsorbent additives on production performance, hematological parameters, and liver histology in juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Frontiers in Animal Science*. 2023. Т. 4. С. 1281722. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1281722>.
18. Phudkliang J., Soonthornchai W., Maele L.V., Xu H., Qi Z., Lee P.-T., Chantiratikul A., Wangkahart E. Studies on the use of mycotoxin binders as an effective strategy to mitigate mycotoxin contamination in aquafeed: A case study in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture Reports*. 2025. Т. 43. С. 102984. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2025.102984>.
19. Kovalsky P.; Kos G.; Nährer K.; Schwab C.; Jenkins T.; Schatzmayr G.; Sulyok M.; Krska R. Co-occurrence of regulated, masked and emerging mycotoxins and secondary metabolites in finished feed and maize—an extensive survey. *Toxins*. 2016. 8. 363.

References:

1. Bashorun, A., Hassan, Z. U., Al-Yafei, M. A. & Jaoua, S. (2023). Fungal contamination and mycotoxins in aquafeed and tissues of aquaculture fishes and their biological control. *Aquaculture*. 576. pp. 01–08. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739892> [in English].
2. Battilani, P., Toscano, P., van der Fels-Klerx, H. J., Moretti, A., Leggieri Camardo, M., Brera, C., et al. (2016). Aflatoxin B1 contamination in maize in Europe increases due to climate change. *Scientific Reports*. 6, p. 24328. <https://doi.org/10.1038/srep24328> [in English].

3. Polotnianko, L., & Mekhed, O. (2023). Nakopychennia mikotoksyniv u m'iazakh koropa luskatoho (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) pry zhodovuvanni kormu, kontaminovanoho T2-toksynom [Accumulation of mycotoxins in the muscles of scaly carp (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) when fed T2-toxin-contaminated feed]. *Pryrodni resursy prykordonnykh terytorii v umovakh zminy klimatu*. Chernihiv: Desna-Polihraf. pp. 105–106. [in Ukrainian].
4. Gruber-Dorninger, C., Müller, A., & Rosen, R. (2025). Multi-Mycotoxin Contamination of Aquaculture Feed: A Global Survey. *Toxins*, 17(3), p. 116. <https://doi.org/10.3390/toxins17030116> [in English].
5. Symonova, N. A., Mekhed, O. B., Kupchuk, O. Y., & Tretyak, O. P. (2018). Toxicants in the degradation of lipids in the organism of scaly carp. *Ukrainian Journal of Ecology*, 8(4), pp. 6–10. [in English].
6. Holovchak, N. P., Tarnovska, A. V., Kotsiumbas, H. I., & Sanahuskyi, D. I. (2012). Protsesy perekysnoho okysnennia lipidiv u zhyvykh orhanizmach: monohrafia [Lipid peroxidation processes in living organisms: monograph]. Lviv: LNU imeni Ivana Franka, 252 p. [in Ukrainian].
7. Osoba, I. A. (2013). Biologichna rol perekysnoho okysnennia lipidiv u zabezpechenni funktsionuvannia orhanizmu ryb [Biological role of lipid peroxidation in ensuring the functioning of fish organisms]. *Rybospodarska nauka Ukrainy*, 1, pp. 87–96. <http://www.fishukr.org.ua> [in Ukrainian].
8. Osoba, I. A., & Hrytsyniak, I. I. (2010). Aktyvnist nefermentatyvnoi lanky systemy antyoksydantnoho zakhystu u pechintsi odnorichok luskatykh ta ramchastykh koropiv nesvytskoho zonalnoho typu [Activity of the non-enzymatic link of the antioxidant defense system in the liver of one-year-old scaly and mirror carp of Nesvytskyi zonal type]. *Rybospodarska nauka Ukrainy*, 3, pp. 62–65. <http://www.fishukr.org.ua> [in Ukrainian].
9. World Medical Association. (2013). World Medical Association Declaration of Helsinki. Ethical principles for medical research involving human subjects. *JAMA*, 310(20), pp. 2191–2194. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053> [in English].
10. Levadna, O. V., Donchenko, H. V., Valutsyna, V. M., et al. (1998). Spivvidnoshennia mizh velychynamy aktyvnosti fermentiv antyoksydantnoi systemy v riznykh tkanynakh intaktnykh shchuriv [Correlation between the activity values of enzymes of the antioxidant system in different tissues of intact rats]. *Ukrainskyi biokhimichnyi zhurnal*, 70(6), pp. 53–58. [in Ukrainian].
11. Ou, P., & Wolf, S. P. (1994). Erythrocyte catalase inactivation (H₂O₂ production) by ascorbic acid and glucose in presence of aminotriazole: role of transition metals and relevance to diabetes. *Biochemical Journal*, 303, pp. 935–940. [in English].
12. Dotsenko, O. I., Dotsenko, V. A., & Mishchenko, A. M. (2010). Aktyvnist superoksyddysmutazy i katalazy v erytrotsyakh i deiakykh tkanynakh myshei v umovakh nyzkochastotnoi vibratsii [Activity of superoxide dismutase and catalase in erythrocytes and some tissues of mice under conditions of low-frequency vibration]. *Fizyka zhyvoho*, 18(1), pp. 107–113. [in Ukrainian].
13. Kostiuk, V. A., Potapovych, A. I., & Kovalova, Zh. V. (1990). Prostyi i chutlyvyi metod vyznachennia aktyvnosti superoksyddysmutazy, osnovanyi na reaktsii okysnennia kvvertsetynu [A simple and sensitive method for determining the activity of superoxide dismutase, based on the reaction of quercetin oxidation]. *Pytannia medychnoi khimii*, (2), pp. 88–91. [in Ukrainian].
14. Lowry, O., Rosebrough, N., Farr, A., & Randall, R. (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagent. *Journal Biological Chemistry*, 193, pp. 265–275. [https://www.jbc.org/article/S0021-9258\(19\)52451-6/pdf](https://www.jbc.org/article/S0021-9258(19)52451-6/pdf) [in English].
15. Koletsy, P., Schrama, J.W., Graat, E.A.M., Wiegertjes, G.F., Lyons, P., & Pietsch, C. (2021). The Occurrence of Mycotoxins in Raw Materials and Fish Feeds in Europe and the Potential Effects of Deoxynivalenol (DON) on the Health and Growth of Farmed Fish Species – A Review. *Toxins*, 13(6), p. 403. <https://doi.org/10.3390/toxins13060403> [in English].
16. Liu, H., Xie, R., Huang, W., Yang, Y., Zhou, M., Lu, B., Li, B., Tan, B., & Dong, X. (2023). Negative effects of aflatoxin B1 (AFB1) in the diet on growth performance, protein and lipid metabolism, and liver health of juvenile hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* *Epinephelus lanceolatus*). *Aquaculture Reports*, 33, p. 101779. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101779> [in English].
17. Fornari, D.C., Peixoto, S., Ksepka, S.P., Bullard, S.A., Rossi, W., Nuzback, D.E., & Davis, D.A. (2023). Effects of dietary mycotoxins and mycotoxin adsorbent additives on production performance, hematological parameters, and liver histology in juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Frontiers in Animal Science*, 4, p. 1281722. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1281722> [in English].
18. Phudkliang, J., Soonthornchai, W., Maele, L.V., Xu, H., Qi, Z., Lee, P.-T., Chantiratikul, A., & Wangkahart, E. (2025). Studies on the use of mycotoxin binders as an effective strategy to mitigate mycotoxin contamination in aqua-feed: A case study in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture Reports*, 43, p. 102984. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2025.102984> [in English].
19. Kovalsky, P., Kos, G., Nährer, K., Schwab, C., Jenkins, T., Schatzmayr, G., Sulyok, M. & Krska, R. (2016). Co-occurrence of regulated, masked and emerging mycotoxins and secondary metabolites in finished feed and maize-an extensive survey. *Toxins*, 8, p. 363 [in English].

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 29.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025

БІОХІМІЧНІ ПОКАЗНИКИ РОСЛИН СОЇ ЗВИЧАЙНОЇ ЗА ІНФІКУВАННЯ ВІРУСОМ МОЗАЇКИ СОЇ

Фанін Ярослав Сергійович,

Ph.D., науковий співробітник, лабораторії біохімії рослин
Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннезнавства та сортовивчення
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3129-7583>

Молодченкова Ольга Олегівна,

доктор біологічних наук, старший науковий співробітник,
завідувач лабораторії біохімії рослин
Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннезнавства та сортовивчення
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2511-0866>

Міщенко Лідія Трохимівна,

доктор біологічних наук, професор
ННЦ «Інститут біології та медицини»
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0697-6971>

Дуніч Аліна Анатоліївна,

кандидат біологічних наук, асистент кафедри вірусології,
ННЦ «Інститут біології та медицини»
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9614-3441>

Міщенко Іван Анатолійович,

кандидат економічних наук, доцент
Національного університету біоресурсів і природокористування України
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2919-8546>

Дащенко Анна Валеріївна,

кандидат сільськогосподарських наук,
кафедра фізіології, біохімії рослин та біоенергетики
Національного університету біоресурсів і природокористування України
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-9943-0710>

Січкач Вячеслав Іванович,

доктор біологічних наук, професор,
завідувач відділу селекції, генетики та насінництва бобових культур
Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннезнавства та сортовивчення
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0581-5068>

Лаврова Галина Дмитрівна,

кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник відділу селекції,
генетики та насінництва бобових культур.
Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннезнавства та сортовивчення
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3086-6572>

У роботі представлено результати комплексного дослідження впливу вірусу мозаїки сої (ВМС) на біохімічні показники рослин сої української селекції. Актуальність теми зумовлена суттєвими втратами врожаю цієї культури внаслідок інфекції, що може сягати 50–70%, а також недостатнім рівнем знань про біохімічні механізми формування захисних реакцій у рослин-хазяїв. Розкриття цих механізмів має ключове значення для селекції та підвищення імунітету сої проти вірусів.

Об'єктом дослідження були здорові та інфіковані ВМС рослини сортів 'Аврора', 'Аріадна', 'Васильківська', 'Зміна', 'Евродіка', 'Серенада', 'Сяйво', 'Одеситка', 'Таврія', 'Фенікс'. Оцінювали вміст загального білка, розчин-

них цукрів, флавоноїдів, хлорофілів *a* і *b*, каротиноїдів, а також активність нейтральної протеази та інгібітора трипсину.

Отримані результати засвідчили, що вірусна інфекція спричиняє комплексні зміни метаболізму: зниження вмісту білка та хлорофілів, що відображає пригнічення фотосинтетичної активності, поряд із підвищенням рівня розчинних цукрів у частини сортів. Водночас виявлено тенденцію до накопичення флавоноїдів і варіабельні зміни у вмісті каротиноїдів, що може свідчити про активацію антиоксидантних та адаптивних механізмів у відповідь на стрес. Характер реакцій відрізнявся між сортами: деякі ('Васильківська', 'Фенікс') продемонстрували більш виражене зростання захисних метаболітів, тоді як інші ('Еврідика', 'Одеситка') виявили більшу вразливість.

Таким чином, результати доводять, що ВМС істотно трансформує білковий, вуглеводний та пігментний обмін у рослин сої, а сортові відмінності реакцій вказують на перспективність використання окремих генотипів у селекції на стійкість до вірусних хвороб. Отримані дані є важливими для глибшого розуміння біохімічних механізмів стійкості та розробки практичних заходів захисту посівів сої.

Ключові слова: соя, вірус мозаїки сої; протеїн; інгібітор трипсину; протеази; біохімічні показники; стійкість рослин.

Fanin Yaroslav, Molodchenkova Olha, Mishchenko Lidiia, Dunich Alina, Mishchenko Ivan, Dashchenko Anna, Sichkar Viacheslav, Lavrova Halyna. Biochemical indicators of common soybean plants infected with soybean mosaic virus

This study presents the results of a comprehensive analysis of the impact of soybean mosaic virus (SMV) infection on the biochemical parameters of soybean plants of Ukrainian breeding. The relevance of the research is determined by the considerable yield losses caused by SMV, which can reach 50–70%, as well as by the insufficient knowledge of the biochemical mechanisms underlying the host–pathogen interactions. Elucidating these mechanisms is crucial for the development of breeding strategies aimed at increasing soybean resistance to viral diseases.

*The objects of the study were healthy and SMV-infected plants of soybean cultivars 'Avrora', 'Ariadna', 'Vasylkivska', 'Zmina', 'Evrídika', 'Serenada', 'Syayvo', 'Odesytka', 'Tavriya', and 'Fenix'. The evaluation included total protein content, soluble sugars, flavonoids, chlorophyll *a* and *b*, carotenoids, as well as the activity of neutral protease and trypsin inhibitor.*

The results showed that viral infection induced complex metabolic changes: a significant reduction in protein and chlorophyll content, reflecting the suppression of photosynthetic activity, accompanied by an increase in soluble sugars in some cultivars. At the same time, a tendency towards flavonoid accumulation and variable changes in carotenoid content were observed, indicating the activation of antioxidant and adaptive mechanisms in response to stress. The nature of responses differed among cultivars: some ('Vasylkivska', 'Fenix') demonstrated more pronounced accumulation of protective metabolites, while others ('Evrídika', 'Odesytka') exhibited higher susceptibility.

Thus, the findings demonstrate that SMV significantly alters protein, carbohydrate, and pigment metabolism in soybean plants, with cultivar-specific responses highlighting the potential of certain genotypes for breeding resistant varieties. These data provide important insights into the biochemical mechanisms of resistance and can be applied in the development of practical strategies for crop protection.

Key words: *Glycine max* L., soybean mosaic virus; protein; trypsin inhibitor; proteases; biochemical indicators; plant resistance.

Вступ. Несприятливі чинники навколишнього середовища є одними з найважливіших факторів, що впливають на урожайність та якість зерна бобових культур, зокрема сої (*Glycine max* L.). У зв'язку з цим застосування різних агротехнічних, селекційних та біотехнологічних підходів до підвищення стійкості рослин до стресів різної природи є одним із ключових завдань аграрної науки.

Різке зниження урожайності бобових культур у несприятливі роки пов'язане не лише з дією екологічних факторів, а й зі зростанням поширеності вірусних інфекцій, що розвиваються на фоні послаблення імунної активності рослинного організму. Встановлено, що незбалансоване живлення, різкі коливання погодних умов, а також низький рівень хімічного захисту послаблюють імунітет рослин і сприяють поширенню вірусних хвороб [1].

Здатність рослин чинити опір несприятливим умовам середовища, зберігаючи життєздатність, значною мірою залежить від активності захисних і пристосувальних механізмів [2]. Адаптаційна здатність та стійкість рослин зумовлені генетичними особливостями й реалізуються у процесі онтогенезу. Значну роль у цьому відіграють біохімічні системи захисту, зокрема індукція синтезу стресових білків, зміни в роботі фер-

ментативних систем, підвищення рівня фітогормонів стресу, активація сигнальних шляхів тощо.

Складовими основних чинників, які лімітують реалізацію продуктивності бобових культур, зокрема сої, є вірусні хвороби. Відомо, що соя схильна до ураження багатьма вірусами, такими як вірус мозаїки сої (ВМС, soybean mosaic virus), вірус мозаїки люцерни (ВМЛ, alfalfa mosaic virus), вірус жовтої мозаїки квасолі (ВЖМК, bean yellow mosaic virus) та ін. [3-5]. Найбільш шкочинним для сої є ВМС. Зниження врожаю при ураженні ВМС складає від 8 до 50-70% [6,7].

Дослідження біохімічних реакцій рослин за умов інфікування вірусами, вказують на важливу роль білкового обміну в забезпеченні фітостійкості. Показано, що серед типових відповідей рослин на вірусну інфекцію є зміна вмісту білків (структурних і ферментативно активних), зростання активності лектинів, збереження активності протеїназ на рівні контрольних (здорових) рослин тощо [8, 9]. У відповідь на вірусну інфекцію в рослинах індукується синтез PR-білків [10].

До потенційно активних компонентів імунітету рослин належать також інгібітори протеаз. Хоча ці речовини відіграють захисну роль, надмірна їх кількість у харчових продуктах може знижувати поживну цінність, оскільки порушує нормальне перетравлення

білків. До інгібіторів протеаз належать інгібітори трипсину та хімотрипсину – природні захисні сполуки, притаманні соєвим бобам, що забезпечують захист від шкідників (птахів, гризунів) і мікроорганізмів. У сирих бобах сої наявні два основні інгібітори протеаз: інгібітор Кунитца та інгібітор Баумана–Бірка, причому останній є більш стійким до дії температури, лугів та кислот. У загальному вмісті сирової сої ці інгібітори становлять приблизно 1,4% і 0,6% відповідно.

Віруси, такі як ВМС, викликають комплексні біохімічні відгуки рослин-хазяїв, зокрема індукцію захисних реакцій, зміну в рівні протеаз та протеазних інгібіторів. Протеазні інгібітори, включно з інгібітором Баумана–Бірка, можуть відігравати подвійну захисну роль: як частини білково-резервної системи насіння, так і як елементи протекторних механізмів, особливо імунної реакції-відгуку [11].

Одним із механізмів, через які вірус може змінювати протеазну активність, є активність вірусного білка 6K1. Наприклад, під час інфекції вірус мозаїки ріпи (*turnip mosaic virus*, TuMV), білок 6K1 пригнічує активність рослинних протеаз, що може сприяти накопиченню вірусних білків та системній інфекції. Отже вірусні білки (наприклад 6K1) можуть пригнічувати активність рослинних протеаз, що дозволяє вірусу обійти захисні механізми хазяїна. Протеазні інгібітори сої, особливо інгібітор Баумана–Бірка, мають потенціал як компонент антивірусної відповіді, завдяки здатності ініціювати інтерферонові сигнальні шляхи – хоч наразі цей ефект продемонстровано не безпосередньо у сої, а в інших системах [12].

Мета роботи. Метою даного дослідження було оцінити вплив вірусної інфекції на біохімічні протекторні реакції в рослинах сої.

Матеріали та методи. Дослідження проводилися на листках 2-х верхніх ярусів рослин сої звичайної (*Glycine max* L.) сортів 'Аврора', 'Аріадна', 'Васильківська', 'Зміна', 'Еввідіка', 'Серенада', 'Сяйво', 'Одеситка', 'Таврія', 'Фенікс' – всі сорти походження селекції Селекційно-генетичного інституту – Національного центру насінництва та сортовивчення (СГІ – НЦНС), у фазі цвітіння. Усі польові досліді закладали згідно з загальноприйнятими методиками за [13].

Ідентифікацію вірусів здійснювали за допомогою імуноферментного аналізу (подвійний сендвіч-варіант) із використанням комерційних тест-систем до ВМС від компанії Loewe (Німеччина) згідно рекомендацій виробника, у трьох повторностях. До аналізу були включені також контролі: позитивний та негативний, що являють собою зразки листків рослин сої, що містять шуканий вірус та зразки здорових рослин, відповідно. Результати ферментативної реакції реєстрували на рідері Termo Labsystems Orpiss MR (США) при довжині хвилі 405 нм. Зразок, оптична густина якого перевищувала значення негативного контролю щонайменше у три рази, вважався за позитивний.

Вміст білка визначали методом К'ельдаля з використанням аналізатора білка/азоту Kjeltac Auto 1030. Загальний вміст флавоноїдів визначали за методикою [14].

Активність нейтральної протеази визначали за допомогою реактива Фоліна за приростом в надосадовій рідині продуктів гідролізу 2%-казеїну (рН 6,0), що не осідають при додаванні 5% трихлороцтової кислоти (ТХО). Активність ензимів виражали в нанокаталах на 1 кг ліофільно висушеної маси проростків. За 1 нанокатал приймали кількість ензиму, що каталізує утворення 1 наномоля тирозину за 1 с інкубації [15]. Активність інгібіторів протеолітичних ферментів визначали за зменшенням швидкості гідролізу синтетичного субстрату БАПА (N- α -бензоїл-dl-аргінін-4-нітроанлід) ензимом в присутності інгібітора [16]. Інгібіторну активність виражали в грамах інактивованого ензиму на 1 кг ліофілізованого матеріалу. Концентрацію білка в екстрактах визначали за методом Лоурі [17]. Визначення вмісту цукрів проводили антроновим методом [18]. Вміст хлорофілів a, b та каротиноїдів визначали спектрофотометричним методом за загальноприйнятою методикою [19].

Експериментальні дослідження проводили у трикратній біологічній повторності для кожного сорту та у трикратній аналітичній повторності.

Дані опрацьовували методом варіаційної статистики з використанням програмного забезпечення LibreOffice Calc (GNU Lesser General Public License). Для оцінки достовірності різниць між варіантами застосовували парний t-тест Стьюдента. Результати вважали статистично значущими при рівні ймовірності $p \leq 0,05$.

Результати і обговорення. Згідно проекту № 2023.03/0244 «Механізми стійкості економічно важливих культур до вірусних хвороб за умов воєнного стану і глобального потепління» конкурсу «Передова наука в Україні» за другим етапом – був проведений скринінг сортів на наявність біохімічних і молекулярних маркерів генетичної стійкості до циркулюючих ізолятів вірусів. За цим етапом було проведено обстеження посівів сої у 2025 році в умовах Одеської області засвідчили наявність симптомів вірусної інфекції, які є типовими для ураження ВМС, а саме мозаїки на листках та деформації листових пластинок (рис. 1).

Результати імуноферментного аналізу (ІФА) підтвердили, що рослини дійсно інфіковані ВМС (рис. 2).

Наступним етапом дослідження було вивчення вмісту білка у листках інфікованих ВМС рослин сої. Результати показали, що у фазі цвітіння в листках інфікованих рослин вміст білка знижувався на 10,8% (у відносних одиницях) порівняно зі здоровими рослинами (рис. 3). В середньому вміст білка у здорових рослин становив 16,40%, тоді як у інфікованих – 14,79%. Проведений парний t-тест показав, що зниження було статистично значущим ($t = 3,46$, $p = 0,007$). Це свідчить, що вірусна інфекція призводила до помітного зменшення даного параметра у більшості сортів, що може бути наслідком порушення метаболічних процесів і зниження фізіологічної активності тканин, що узгоджуються з даними, наведеними в літературі [20, 21].

Наступним етапом дослідження було вивчення вмісту хлорофілу a та b, розчинних цукрів і флавоноїдів



Рис. 1. Рослини сої сорту сої Васильківська: 1 – інфіковані ВМС; 2,3 – здорові

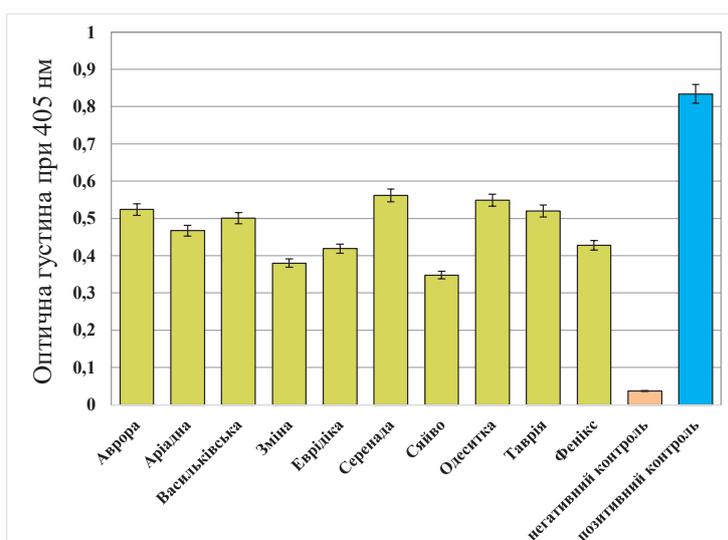


Рис. 2. Вміст антигенів ВМС у листках рослин сої різних сортів із симптомами мозаїки та деформації за результатами ІФА

дів у листках інфікованих ВМС рослин сої. Також було виявлено значне зменшення вмісту хлорофілу *a* (на 69,1%). У здорових рослин середній вміст хлорофілу *a* становив 97,06 мг/100 г, тоді як у інфікованих – лише 39,67 мг/100 г (рис. 4-5). Вміст хлорофілу *b* також зменшився на 65,0%, при середньому значенні у здорових рослин 70,26 мг/100 г, а у хворих – 42,56 мг/100 г. Проведені дослідження показали, що у фазі цвітіння вміст каротиноїдів у вірусінфікованих рослин знижувався на 30,7% (рис. 6). Середній вміст каротиноїдів у листках здорових рослин становив 126,5 мг/100 г, тоді як у інфікованих – 96,8 мг/100 г.

Важливу роль в адаптаційних процесах рослин за дії несприятливих чинників різної природи відіграють цукри та флавоноїди [1,22]. Отримані результати показали, що ураження вірусною інфекцією супроводжувалося зниженням вмісту цукрів на 7,8%, а вмісту флавоноїдів – на 3,1% у середньому порівняно зі здоровими рослинами (табл. 1).

Однак, на відміну від попередніх результатів, за цими показниками спостерігалася варіативність: у деяких сортів вміст цукрів і флавоноїдів був вищим у інфікованих рослин, ніж у контрольних. Відомо, що зниження відтоку асимілятів із хлоропластів і листка

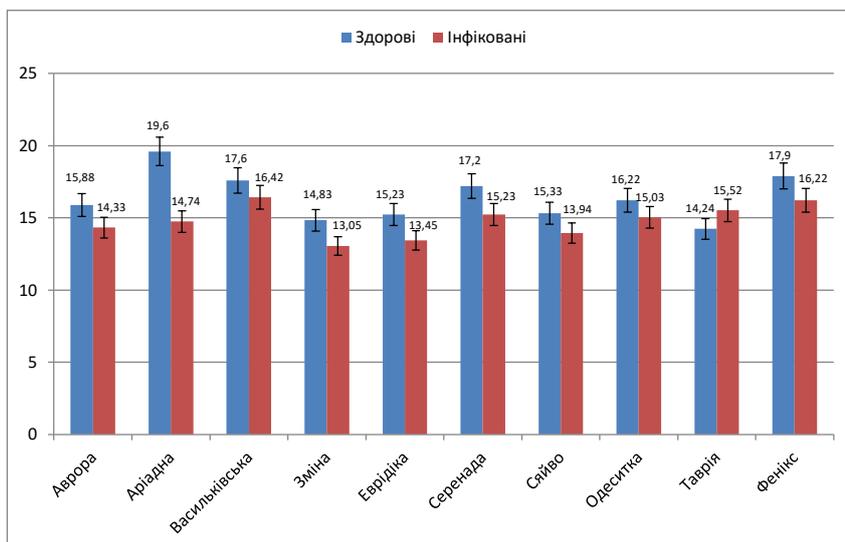


Рис. 3. Вплив ВМС на вміст білка в листках рослин сої різних сортів, %

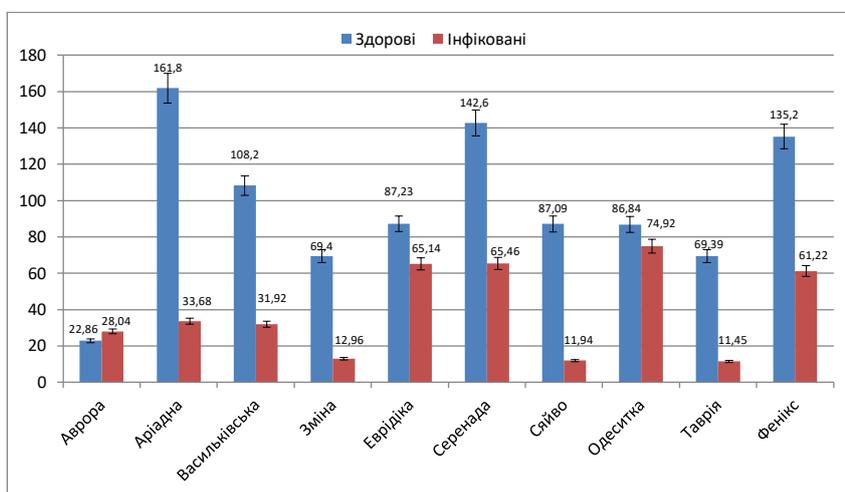


Рис. 4. Вплив вірусної інфекції на вміст хлорофілу *a* в листках рослин сої різних сортів, мг/100 г

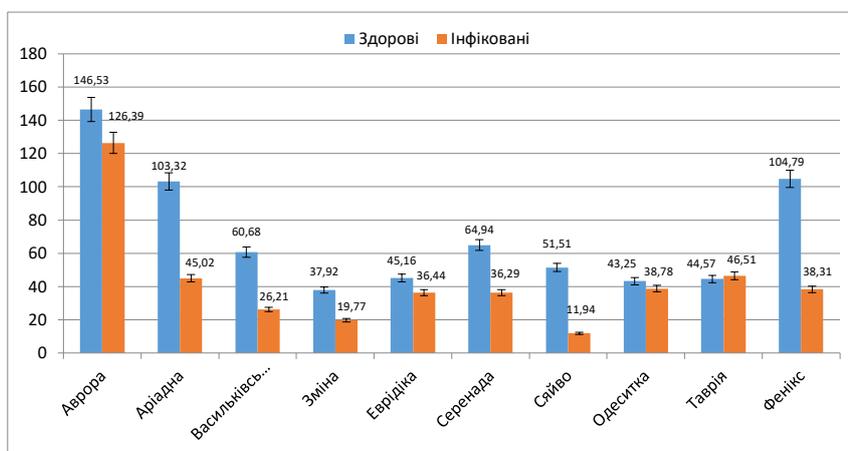


Рис. 5. Вплив вірусної інфекції на вміст хлорофілу *b* в листках рослин сої різних сортів, мг/100 г

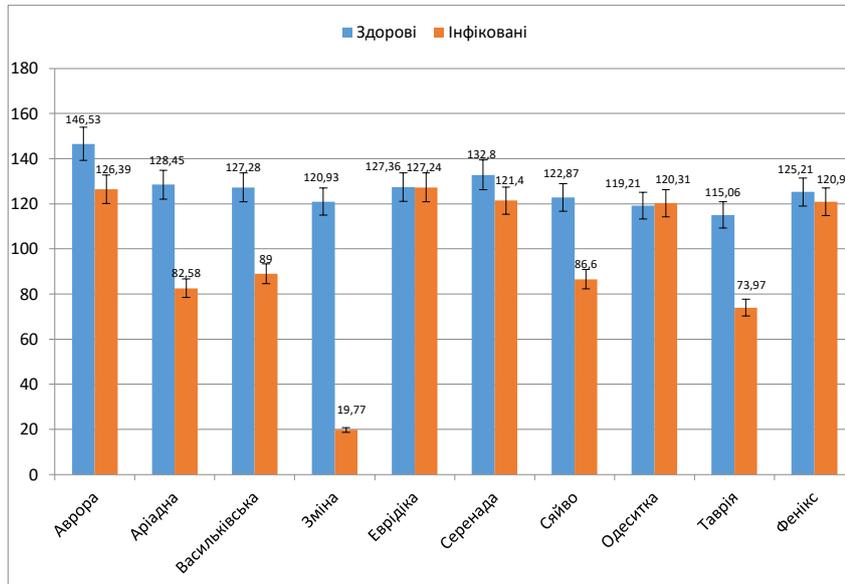


Рис. 6. Вплив вірусної інфекції на вміст каротиноїдів в листках рослин сої різних сортів, мг/100 г

в цілому може призводити до накопичення цукрів у фотосинтезуючих органах. Такий процес, з одного боку, здатний пригнічувати фотосинтез за механізмом зворотного зв'язку, але з іншого – може мати захисне (протекторне) значення [23].

Середні значення активності інгібітора трипсину в листках сої склали $1,215 \pm 0,34$ мг/г у здорових рослин та $0,93 \pm 0,22$ мг/г у інфікованих ВМС. Парний t-тест ($t = 0,323$; $p = 0,754$) показав відсутність статистично значущої різниці між групами, що свідчить про високу варіабельність реакції різних генотипів на вірусну інфекцію (рис. 7).

З наукової літератури відомо, що активність інгібіторів протеаз у рослинах може як зростати, так і знижуватися в залежності від типу патогена, інтенсивності інфекційного процесу та генетичних особливостей сорту [24]. Для бобових, зокрема сої, інгібітори трипсину відіграють роль у формуванні неспецифічної резистентності, зменшуючи деградацію білків рослини під дією протеаз патогену. Отримані дані підтверджу-

ють, що в умовах вірусного ураження у частини сортів (наприклад, 'Зміна', 'Еврідіка') активність інгібіторів навіть зростає, що може бути елементом адаптивної відповіді, тоді як в інших (наприклад, 'Аріадна', 'Аврора') спостерігається зниження (рис. 7).

У подальших дослідженнях було проаналізовано активність нейтральної протеази у листках рослин сої. Отримані результати показали, що активність нейтральної протеази була значно вищою у вірусінфікованих рослин – на 79,9% порівняно зі здоровими. Зокрема, середня активність нейтральної протеази у листках здорових рослин становила 330,0 нкат/кг, тоді як у інфікованих – 593,78 нкат/кг.

Аналогічні зміни спостерігалися і при розрахунку питомої активності нейтральної протеази. У здорових рослин середній показник становив 1495,7 нкат/г білка, тоді як у інфікованих – 2411,14 нкат/г білка (табл. 2). Таким чином, при інфікуванні активність питомої активності нейтральної протеази зростала на 61,2%.

Таблиця 1

Вплив вірусної інфекції на вміст цукрів та флавоноїдів, в листках рослин сої (фаза цвітіння).

Сорт	Вміст цукрів, %		Вміст флавоноїдів, мг/г	
	Здорові	Інфіковані	Здорові	Інфіковані
Аврора	6,62±0,37	6,20±0,05	2,19±0,01	1,45±0,05
Аріадна	7,45±0,35	6,80±0,27	1,44±0,03	2,00±0,02
Васильківська	8,41±0,22	7,62±0,05	1,36±0,03	1,51±0,02
Зміна	8,61±0,28	8,61±0,34	1,51±0,02	1,76±0,05
Еврідіка	7,51±0,04	8,11±0,34	1,66±0,02	1,53±0,03
Серенада	8,21±0,18	7,40±0,03	1,47±0,03	1,30±0,01
Сяйво	7,37±0,37	7,92±0,51	1,56±0,01	1,27±0,03
Одеситка	9,12±0,26	8,18±0,14	1,86±0,04	1,85±0,03
Таврія	12,49±0,05	9,96±0,18	1,63±0,02	1,54±0,02
Фенікс	8,52±0,05	7,40±0,11	1,55±0,03	1,57±0,01
Середнє	8,43 ±0,51	7,82±0,32	1,62±0,07	1,57±0,07

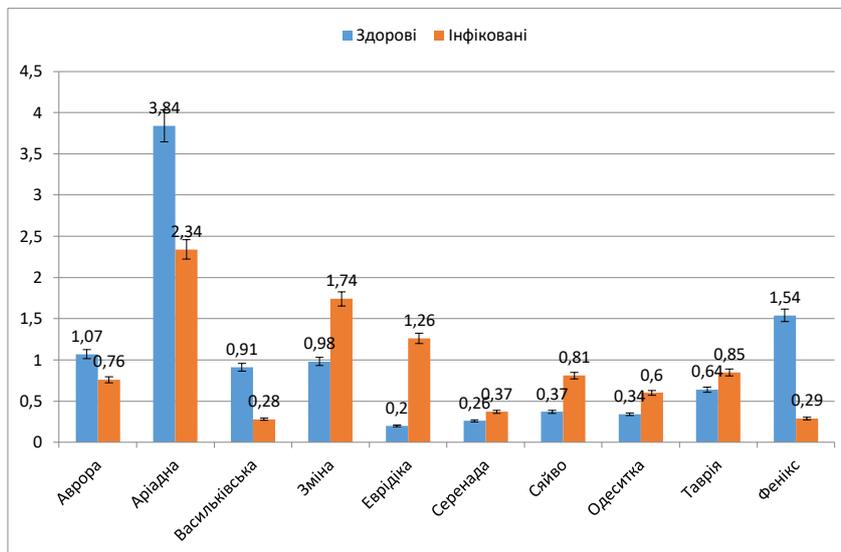


Рис. 7. Вплив вірусної інфекції на активність інгібітору трипсину в листках рослин сої різних сортів, мг/г

Таким чином, вірусна інфекція призводила до достовірного підвищення активності нейтральної протеази у всіх досліджених сортів сої: середнє значення для здорових рослин становило 330,01 н-кат/кг, тоді як для інфікованих – 593,78 н-кат/кг ($t = -6,17$, $p < 0,001$). Розрахований показник питомої активності нейтральної протеази демонстрував чітке зростання при інфекції (1495,7 проти 2411,14 нкат/г білка; $t = -4,79$, $p < 0,001$). Це свідчить про активацію протеолітичних процесів як однієї з біохімічних протекторних реакцій рослин на вірусне ураження.

Результати дослідження співвідношення активності нейтральної протеази до активності інгібітора трипсину показали суттєві відмінності між здоровими та інфікованими генотипами сої. У середньому цей показник у здорових рослин становив 721,9, тоді як у інфікованих – 996,7. Хоча середні значення демонструють тенденцію до зростання після інфекції, проведений парний t-тест показав, що різниця статистично незначуща ($t = 0,80$, $p = 0,45$). Це свідчить про наявність високої варіабельності реакцій серед сортів, що узгоджується з літературними даними, які вказують на генотип-специфічний характер біохімічних реакцій-відгуку рослин на вірусні інфекції [25].

Аналіз індивідуальних сортів показав наступні закономірності. Так, у сортів 'Аврора', 'Аріадна', 'Васильківська', 'Зміна', 'Серенада', 'Таврія' та 'Фенікс' спостерігалось значне підвищення співвідношення активності нейтральної протеази/активності інгібітора трипсину за інфікування ВМС. Найбільший приріст співвідношення зафіксовано у сортів 'Васильківська' (з 343,6 до 2495,2) та 'Фенікс' (з 172,8 до 1703,7), що свідчить про різке посилення протеазної активності відносно інгібіторів (рис.8). Це може вказувати на формування захисної реакції-відгуку шляхом мобілізації протеолітичних ферментів.

Натомість у сортів 'Еврідіка' та 'Одеситка' спостерігалось зниження співвідношення після інфекції (з 2358,4 до 444,3 та з 1178,9 до 787,8 відповідно), що

може свідчити про пригнічення протеазної активності вірусом. Подібні механізми описані для білка 6К1 вірусу мозаїки ріпи, який блокує активність рослинних протеаз для полегшення реплікації вірусу. З іншого боку, є дані про те, що інгібітори протеаз беруть участь у формуванні стійкості деяких рослин як це було, наприклад, показано для інгібітора аспарагінової протеази *STP15* у рослинах картоплі та його участі у регуляції захисних генів проти Y-вірусу картоплі [24].

Таким чином, підвищення співвідношення активності нейтральної протеази/активності інгібітора трипсину у відповідь на вірусну інфекцію можна розглядати як можливий індикатор стійкості рослин сої, тоді як його зниження може свідчити про сприйнятливості до патогену. Відомо, що протеази з різних родин беруть участь майже на кожному етапі становлення імунітету рослин, починаючи зі зустрічі з патогеном в апопласті та закінчуючи їх участю в SAR (системній набутій стійкості) [25].

Перспективи подальших досліджень. У подальших дослідженнях доцільно встановити взаємозв'язок між виявленими закономірностями змін біохімічних показників у листках рослин та урожайністю різних сортів сої, а також їх стійкістю до вірусних хвороб. На основі отриманих результатів планується розробка методичних рекомендацій щодо профілактики фітовірусних захворювань з урахуванням специфіки агрокліматичних умов вирощування в Україні.

Крім того, результати досліджень слугуватимуть основою для добору сортів сої з господарсько-цінними ознаками та комплексною стійкістю – як до несприятливих кліматичних умов, так і до вірусних інфекцій. Такі сорти рекомендовано для впровадження у селекційну практику та подальше використання в сільському господарстві.

Висновки. Ураження рослин сої вірусом мозаїки сої (ВМС) супроводжується порушенням роботи фотосинтетичного апарату, зниженням вмісту хлорофілів

Активність нейтральної протеази в листках здорових і уражених ВМС рослинах сої.

Сорт	Активність нейтральної протеази н-кат/кг	Вміст білка, г/г сухої маси	Питома активність нейтральної протеази, нкат/г білка
Здорові рослини			
Аврора	212,51±21,3	0,2586±0,003	821,77±128,0
Аріадна	464,41±34,4	0,2192±0,004	2118,66±238,1
Васильківська	312,66±29,3	0,2145±0,009	1499,58±145,9
Зміна	189,82±12,3	0,2192±0,011	865,97±102,9
Еврідика	471,67±30,2	0,2350±0,009	2007,11±211,8
Серенада	325,25±26,9	0,1892±0,012	1719,08±122,0
Сяйво	329,01±27,2	0,2003±0,005	1642,59±118,9
Одеситка	400,83±32,1	0,2326±0,003	1723,26±95,9
Таврія	327,81±28,5	0,2160±0,004	1517,64±127,0
Фенікс	266,16±31,3	0,2555±0,006	1041,72±132,9
Середнє	330,01±30,0	0,224±0,007	1495,7±142,6
Інфіковані рослини			
Аврора	713,00±32,3	0,3174±0,011	2246,38±129,3
Аріадна	669,94±34,5	0,2887±0,012	2320,54±94,4
Васильківська	698,65±28,9	0,2067±0,014	3380,02±89,4
Зміна	533,51±36,2	0,2127±0,009	2508,28±145,3
Еврідика	559,88±38,2	0,2604±0,008	2150,08±165,3
Серенада	557,48±39,2	0,1895±0,008	2940,85±156,9
Сяйво	698,65±25,6	0,3437±0,013	2032,73±167,3
Одеситка	472,70±21,5	0,1878±0,017	2517,04±121,1
Таврія	539,95±24,9	0,2490±0,016	2168,47±102,3
Фенікс	494,07±28,5	0,2594±0,019	1846,99±112,2
Середнє	593,78±28,9	0,252±0,017	2411,1±143,9

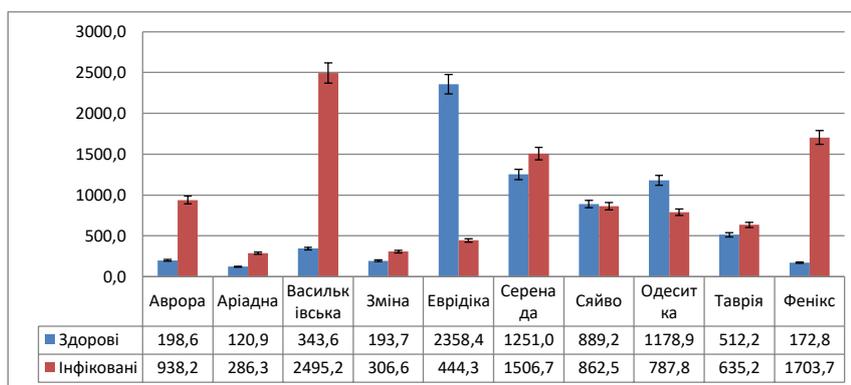


Рис. 8. Співвідношення активності нейтральної протеази до активності інгібітора трипсину у здорових та інфікованих ВМС рослинах сої різних сортів

та білка в листках, а також значними змінами у вмісті флавоноїдів та розчинних цукрів. Це свідчить про глибоку перебудову метаболізму під впливом інфекції.

Дослідження показали, що між сортами існують суттєві відмінності у реакції на інфекцію. У низки сортів ('Васильківська', 'Фенікс') виявлено підвищене співвідношення активності нейтральної протеази до інгібітора трипсину, що може розглядатися як ознака потенційної стійкості. Натомість у сортів 'Еврідика' та 'Одеситка' цей показник знижувався, що свідчить про вищу чутливість до вірусної інфекції.

Важливою практичною цінністю є виявлення сортів з більш стійкими ознаками біохімічної від-

повіді, що дозволяє використовувати їх як джерела для селекції та адаптації виробництва до умов поширення вірусних хвороб. Отримані результати підтверджують необхідність урахування біохімічних маркерів (вміст хлорофілів, флавоноїдів, активність протеаз та інгібіторів) при відборі сортів, здатних забезпечувати стабільну врожайність у стресових умовах.

Робота виконана за фінансової підтримки НФДУ. Проект № 2023.03/0244 «Механізми стійкості економічно важливих культур до вірусних хвороб за умов воєнного стану і глобального потепління» конкурсу «Передова наука в Україні».

Література:

1. Міщенко Л.Т. Вірусні хвороби озимої пшениці. Київ : Фітосоціоцентр, 2009. 352 с.
2. Mishchenko L., Dunich A., Mishchenko I., Berlizov V., Petrenkova V., Molchanets O. Influence of climate change on wheat viruses variability in Ukraine. *Agriculture & Forestry*. 2017. Vol. 63, No. 4. P. 43–50. <https://doi.org/10.17707/agricultforest.63.4.04>.
3. Irvin M.E., Schultz G.A. Soybean mosaic virus. *FAO Plant Protection Bulletin*. 1981. Vol. 29. P. 41–55.
4. Naghavi A., Habibi M.K., Firouzabadi F.N. Detection and identification of some soybean viral mosaic viruses using molecular techniques in Lorestan Province, South West of Iran. *Asian Journal of Plant Science*. 2008. Vol. 7. P. 557–562.
5. Strömvik M.V., Latour F., Archambault A., Vodkin L.O. Identification and phylogenetic analysis of sequences of Bean pod mottle virus, Soybean mosaic virus, and Cowpea chlorotic mottle virus in expressed sequence tag data from soybean. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 2006. Vol. 28. P. 1–12.
6. Usovsky M., Chen P., Li D., Wang A., Shi A., Zheng C., Shakiba E., Lee D., Vieira C.C., Lee Y.C., Wu C., Cervantez I., Dong D. Decades of genetic research on Soybean mosaic virus resistance in soybean. *Frontiers in Microbiology*. 2022. Vol. 13. P. 1122. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1122>.
7. Farmer E.E., Ryan C.A. Interplant communication: airborne methyl jasmonate induces synthesis of proteinase inhibitors in plant leaves. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1990. Vol. 87, No. 19. P. 7713–7716. <https://doi.org/10.1073/pnas.87.19.7713>.
8. Jain D., Khurana J.P., Singh A., Singh I. (Eds.). Role of pathogenesis-related (PR) proteins in plant defense mechanism. In: *Molecular Aspects of Plant-Pathogen Interaction*. Singapore : Springer, 2018. P. 265–280. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7371-7_13.
9. Hernández J.A., Gullner G., Clemente-Moreno M.J., Künstler A., Juhász C., Díaz-Vivancos P., Király L. Oxidative stress and antioxidative responses in plant–virus interactions. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2016. Vol. 94. P. 134–148. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2015.09.001>.
10. Кириченко А.М. Вплив вірусу жовтої мозаїки квасолі на метаболізм фотосинтетичних пігментів, білків і вуглеводів у *Glucine soja* L. *Мікробіологічний журнал*. 2014. Т. 76, № 1. С. 47–52.
11. Mao C., Shan S., Huang Y., Jiang C., Zhang H., Li Y., Chen J., Wei Z., Sun Z. The hypervariable N-terminal of soybean mosaic virus P1 protein influences its pathogenicity and host defense responses. *Phytopathology Research*. 2022. Vol. 4. Article 10. <https://doi.org/10.1186/s42483-022-00115-3>.
12. Bera S., Arena G.D., Ray S., Flannigan S., Casteel C.L. The potyviral protein 6K1 reduces plant proteases activity during Turnip mosaic virus infection. *Viruses*. 2022. Vol. 14, No. 6. P. 1341. <https://doi.org/10.3390/v14061341>.
13. Determination of the total nitrogen content of hard, semihard, and processed cheese by the Kjeldahl method (Collaborative Study). *Journal of AOAC International*. 2004. Vol. 87, No. 2. P. 396–406.
14. Єщенко, В. О., Копитко, П. Г., Опришко, В. П. Основи наукових досліджень в агрономії / за ред. В. О. Єщенко. – Київ : Дія, 2005. – 288 с.
15. Breite A. G., Dwulet F. E., McCarthy R. C. Tissue dissociation enzyme neutral protease assessment. *Transplantation Proceedings*. 2010. Vol. 42, No. 6. P. 2052–2054. <https://doi.org/10.1016/j.transproceed.2010.05.118>
16. Liu K. Soybean trypsin inhibitor assay: further improvement of the standard method approved and reapproved by American Oil Chemists Society and American Association of Cereal Chemists International. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 2019. Vol. 96. P. 635–645. <https://doi.org/10.1002/aocs.12273>.
17. Lowry O.H., Rosebrough N.J., Farr A.L., Randall R.J. Protein measurement with the Folin phenol reagent. *Journal of Biological Chemistry*. 1951. Vol. 193, No. 1. P. 265–275.
18. Hedge, J. E., & Hofreiter, B. T. Carbohydrate chemistry. In Whistler, R. L. & Be Miller, J. N. (Eds.) *Methods in Carbohydrate Chemistry*. New York: Academic Press, 1962. P. 17–22.
19. Ritchie, R. J. Consistent sets of spectrophotometric chlorophyll equations for acetone, methanol and ethanol solvents. *Photosynthesis Research*. 2006. Vol. 89, No. 1. P. 27–41. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11120-006-9065-9>
20. Mishchenko L.T., Dunich A.A., Skrypkin I.Y., Kozub N.O. Phylogenetic analysis of two Ukrainian isolates of Wheat streak mosaic virus. *Biopolymers and Cell*. 2019. Vol. 35, No. 1. P. 64–77. <https://doi.org/10.7124/bc.000997>.
21. Campos R.E., Bejerman N., Nome C., Laguna I., Rodriguer P.P. Bean Yellow mosaic virus in soybean from Argentina. *Journal of Phytopathology*. 2014. Vol. 162. P. 222–325.
22. Mishchenko L.T., Dunich A.A., Shevchenko T.P., Budzanivska I.G., Polischuk V.P., Andriyuk O.M., Molchanets O.V., Antipov I.O. Detection of soybean mosaic virus in some left-bank forest-steppe regions of Ukraine. *Мікробіологічний журнал*. 2017. Т. 79, № 3. С. 3–14.
23. Zakaryan H., Arabyan E. , Oo A. , Zandi K. Flavonoids: promising natural compounds against viral infections. *Arch Virol*. 2017. Vol. 162. P.2539–2551.
24. Osmani, Z., Sabet, M.S. & Nakahara, K.S. (2022). Aspartic protease inhibitor enhances resistance to potato virus Y and A in transgenic potato plants. *BMC Plant Biol* 22, 241. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03596-8>
25. Misas-Villamil, J.C., van der Hoorn, R.A., Doehlemann, G. (2016). Papain-like cysteine proteases as hubs in plant immunity. *New Phytol.* 212, 902–907.

References:

1. Mishchenko, L. T. (2009). *Virusni khvoroby ozymoi pshenytsi* [Viral diseases of winter wheat]. Kyiv: Fitosotsiotsentr. 352 p. [in Ukrainian].
2. Mishchenko, L., Dunich, A., Mishchenko, I., Berlizov, V., Petrenkova, V., & Molchanets, O. (2017). Influence of climate change on wheat viruses variability in Ukraine. *Agriculture & Forestry*, 63(4), 43–50. <https://doi.org/10.17707/agricultforest.63.4.04>

3. Irvin, M. E., & Schultz, G. A. (1981). Soybean mosaic virus. *FAO Plant Protection Bulletin*, 29, 41–55.
4. Naghavi, A., Habibi, M. K., & Firouzabadi, F. N. (2008). Detection and identification of some soybean viral mosaic viruses using molecular techniques in Lorestan Province, South West of Iran. *Asian Journal of Plant Science*, 7, 557–562.
5. Strömvik, M. V., Latour, F., Archambault, A., & Vodkin, L. O. (2006). Identification and phylogenetic analysis of sequences of Bean pod mottle virus, Soybean mosaic virus, and Cowpea chlorotic mottle virus in expressed sequence tag data from soybean. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 28, 1–12.
6. Usovsky, M., Chen, P., Li, D., Wang, A., Shi, A., Zheng, C., Shakiba, E., Lee, D., Vieira, C. C., Lee, Y. C., Wu, C., Cervantez, I., & Dong, D. (2022). Decades of genetic research on Soybean mosaic virus resistance in soybean. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1122. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1122>
7. Farmer, E. E., & Ryan, C. A. (1990). Interplant communication: Airborne methyl jasmonate induces synthesis of proteinase inhibitors in plant leaves. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 87(19), 7713–7716. <https://doi.org/10.1073/pnas.87.19.7713>
8. Jain, D., Khurana, J. P., Singh, A., & Singh, I. (Eds.). (2018). Role of pathogenesis-related (PR) proteins in plant defense mechanism. In *Molecular Aspects of Plant-Pathogen Interaction* (pp. 265–280). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7371-7_13
9. Hernández, J. A., Gullner, G., Clemente-Moreno, M. J., Künstler, A., Juhász, C., Díaz-Vivancos, P., & Király, L. (2016). Oxidative stress and antioxidative responses in plant–virus interactions. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 94, 134–148. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2015.09.001>
10. Kyrychenko, A. M. (2014). Vplyv virusu zhovtoi mozaiky kvasoli na metabolizm fotosyntetychnykh pigmentiv, bilkiv i vuhlevodiv u *Glycine soja* L. [Effect of bean yellow mosaic virus on metabolism of photosynthetic pigments, proteins and carbohydrates in *Glycine soja* L.]. *Mikrobiolohichnyi zhurnal*, 76(1), 47–52. [in Ukrainian].
11. Mao, C., Shan, S., Huang, Y., Jiang, C., Zhang, H., Li, Y., Chen, J., Wei, Z., & Sun, Z. (2022). The hypervariable N-terminal of soybean mosaic virus P1 protein influences its pathogenicity and host defense responses. *Phytopathology Research*, 4, Article 10. <https://doi.org/10.1186/s42483-022-00115-3>
12. Bera, S., Arena, G. D., Ray, S., Flannigan, S., & Casteel, C. L. (2022). The potyviral protein 6K1 reduces plant proteases activity during Turnip mosaic virus infection. *Viruses*, 14(6), 1341. <https://doi.org/10.3390/v14061341>
13. Determination of the total nitrogen content of hard, semihard, and processed cheese by the Kjeldahl method (Collaborative Study). (2004). *Journal of AOAC International*, 87(2), 396–406.
14. Yeshchenko, V. O., Kopytko, P. H., & Opryshko, V. P. (2005). Osnovy naukovykh doslidzhen v agronomii [Fundamentals of scientific research in agronomy] (V. O. Yeshchenko, Ed.). Kyiv: Diia. 288 p. [in Ukrainian].
15. Breite, A. G., Dwulet, F. E., & McCarthy, R. C. (2010). Tissue dissociation enzyme neutral protease assessment. *Transplantation Proceedings*, 42(6), 2052–2054. <https://doi.org/10.1016/j.transproceed.2010.05.118>
16. Liu, K. (2019). Soybean trypsin inhibitor assay: Further improvement of the standard method approved and reapproved by American Oil Chemists Society and American Association of Cereal Chemists International. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 96(3), 635–645. <https://doi.org/10.1002/aocs.12273>
17. Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr, A. L., & Randall, R. J. (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagent. *Journal of Biological Chemistry*, 193(1), 265–275.
18. Hedge, J. E., & Hofreiter, B. T. (1962). Carbohydrate chemistry. In R. L. Whistler & J. N. Be Miller (Eds.), *Methods in Carbohydrate Chemistry* (pp. 17–22). Academic Press.
19. Ritchie, R. J. (2006). Consistent sets of spectrophotometric chlorophyll equations for acetone, methanol and ethanol solvents. *Photosynthesis Research*, 89(1), 27–41. <https://doi.org/10.1007/s11120-006-9065-9>
20. Mishchenko, L. T., Dunich, A. A., Skrypkina, I. Y., & Kozub, N. O. (2019). Phylogenetic analysis of two Ukrainian isolates of Wheat streak mosaic virus. *Biopolymers and Cell*, 35(1), 64–77. <https://doi.org/10.7124/bc.000997>
21. Campos, R. E., Bejerman, N., Nome, C., Laguna, I., & Rodriguer, P. P. (2014). Bean Yellow mosaic virus in soybean from Argentina. *Journal of Phytopathology*, 162, 222–325.
22. Mishchenko, L. T., Dunich, A. A., Shevchenko, T. P., Budzanivska, I. G., Polischuk, V. P., Andriychuk, O. M., Molchanets, O. V., & Antipov, I. O. (2017). Detection of soybean mosaic virus in some left-bank forest-steppe regions of Ukraine. *Mikrobiolohichnyi zhurnal*, 79(3), 3–14. [in Ukrainian].
23. Zakaryan, H., Arabyan, E., Oo, A., & Zandi, K. (2017). Flavonoids: promising natural compounds against viral infections. *Arch Virol*, 162, 2539–2551.
24. Osmani, Z., Sabet, M.S. & Nakahara, K.S. (2022). Aspartic protease inhibitor enhances resistance to potato virus Y and A in transgenic potato plants. *BMC Plant Biol* 22, 241. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03596-8>
25. Misas-Villamil, J.C., van der Hoorn, R.A., Doehlemann, G. (2016). Papain-like cysteine proteases as hubs in plant immunity. *New Phytol.* 212, 902–907.

Дата першого надходження рукопису до видання: 26.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 30.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025

2. ЕКОЛОГІЯ

UDC 504.064.36:351.777

DOI <https://doi.org/10.32782/naturalspu/2025.2.10>

REGULATORY FRAMEWORK OF REGIONAL ENVIRONMENTAL MONITORING IN UKRAINE: CHALLENGES AND IMPROVEMENT PATHWAYS IN THE POST-WAR PERIOD

Belokon Karina Volodymyrivna,

Candidate of Engineering Science, Associate Professor,
Deputy Director for Research of the Engineering
Educational and Scientific Institute by name of Yu.M. Potebnya
Part-time Associate Professor,
Department of Metallurgical Technologies, Ecology, and Technogenic Safety
Zaporizhzhia National University
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2000-4052>
Scopus Author ID: 56196099400
Web of Science Researcher ID: AAD-2453-2019

Pirohova Iryna Mykolaivna,

Deputy Director of the Department of Environmental
Protection of the Zaporizhzhia Regional State Administration
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-3335-3063>

Malovanyy Myroslav Stepanovych,

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Ecology and Sustainable Environmental Management
Lviv Polytechnic National University
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3868-1070>
Scopus-Author ID: 55866662500

Dzhygyrey Iryna Mykolaivna,

PhD, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Artificial Intelligence,
Educational and Research Institute for Applied System Analysis,
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8360-447X>
Scopus Author ID: 22233812100

This article analyzes the current state of the regulatory framework for creating regional environmental monitoring centers within the framework of developing the state environmental monitoring system in Ukraine. Key provisions of new legislative acts regulating the creation of regional environmental monitoring centers, the functioning of information systems, and the procedure for collecting and using environmental information are reviewed. The study identifies the main shortcomings of the legislative basis: ambiguity in defining the powers and responsibilities of authorities, a lack of funding mechanisms, a lack of standards and monitoring methods, unclear requirements for technical support, and the absence of clear criteria for evaluating the system's effectiveness. Other issues include limited public access to information, insufficient integration with international systems, and personnel and technical shortages (specialists, software, technical, and resource support for regional environmental monitoring centers). Directions for improving the regulatory framework for the functioning of regional environmental monitoring centers for effective environmental management are proposed. These include: a clear hierarchy and division of powers; defining specific tasks and areas of responsibility for each body; establishing stable funding sources; mandatory publication of monitoring results; national standards and monitoring methods that comply with international requirements to ensure data reliability and comparability; unified information exchange protocols to ensure compatibility and operational data transfer; standardized technical requirements for equipment and measurement methods; a system of indicators for regular monitoring effectiveness evaluation; and a set of protocols and management decisions to be activated at the regional level when certain conditions or level exceedances occur.

Key words: environmental monitoring, regional centers, environmental information, management, post-war recovery, legislative framework.

Белоконь Каріна, Пірогова Ірина, Мальований Мирослав, Джигирей Ірина. Нормативно-правова база регіонального моніторингу довкілля в Україні: виклики та шляхи вдосконалення у повоєнний період

У статті проаналізовано сучасний стан нормативно-правового забезпечення створення регіональних центрів моніторингу довкілля в рамках розбудови державної системи моніторингу довкілля в Україні. Розглянуто ключові положення нових законодавчих актів, що регламентують створення регіональних центрів моніторингу, функціонування інформаційних систем, порядок збору та використання екологічної інформації. Визначено основні недоліки законодавчої бази: нечіткість у визначенні повноважень та відповідальності органів, відсутність механізмів фінансування, стандартів та методик моніторингу, чітких вимог до технічного забезпечення, чітких критеріїв оцінки ефективності системи моніторингу, обмежений доступ громадськості до інформації, недостатня інтеграція з міжнародними системами, кадровий та технічний голод (спеціалісти, програмне, технічне та ресурсне забезпечення регіональних центрів моніторингу довкілля). Запропоновано напрями удосконалення нормативно-правової бази функціонування регіональних центрів моніторингу довкілля для ефективного екологічного управління: чітка ієрархія та розподіл повноважень; визначення конкретних завдань та сфери відповідальності кожного органу; визначення сталих джерел фінансування; обов'язок публікування результатів моніторингу; національні стандарти та методики моніторингу, які відповідатимуть міжнародним вимогам та забезпечать достовірність і порівнянність даних; єдині протоколи обміну інформацією з іншими інформаційними системами, сумісність та оперативність передачі інформації; стандартизовані технічні вимоги до обладнання та методів вимірювання; система показників для регулярної оцінки ефективності моніторингу; набір протоколів, управлінських рішень, які запускаються при настанні певних умов або перевищенні рівнів – для запровадження на регіональному рівні.

Ключові слова: моніторинг довкілля, регіональні центри, екологічна інформація, управління, повоєнне відновлення, законодавча база.

Introduction. One of the key components of the state's environmental and socio-economic security system is the system for monitoring, accounting for, and controlling the state of the natural environment and its natural resource potential. Amidst growing global threats caused by climate change, the increased probability of natural phenomena or disasters (such as floods and droughts), a growing scarcity of natural resources, the pollution of habitats for humans, animals, and plants, and the comprehensive and continuously progressing informatization of humanity, the issues of making optimal and prompt decisions in the field of environmental protection are gaining significant importance.

The basis for the creation and existence of the state environmental monitoring system is Article 50 of the Constitution of Ukraine, which guarantees everyone the right to free access to information about the state of the environment, as well as the right to disseminate it. The Law of Ukraine «On Environmental Protection» [1] provides for the creation of a state environmental monitoring system and for conducting observations of the state of the environment and its pollution levels. The performance of these functions is assigned to the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine and other central executive bodies that are subjects of the state environmental monitoring system, as well as enterprises, institutions, and organizations whose activities lead or may lead to a deterioration of the state of the environment.

The main principles for the functioning of the state environmental monitoring system are defined in the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 30.03.1998 No. 391 «On the Approval of the Regulation on the State Environmental Monitoring System» [2]. According to it, the state environmental monitoring system is a system for observing, collecting, processing, transmitting, storing, and analyzing information about the state of the environment, forecasting its changes, and developing scientifically-based recommendations for making decisions on preventing negative changes to the environment and complying with environmental safety requirements. The said Regula-

tion defines the procedure for the creation and functioning of the state environmental monitoring system in Ukraine, and assigns environmental objects to each of the monitoring subjects at the level of the state system's subsystems.

Currently, the state environmental monitoring system includes the following subsystems: monitoring in the field of atmospheric air protection; state water monitoring; land monitoring (land and soil monitoring); forest monitoring; monitoring of the plant world; monitoring of the animal world; background environmental monitoring (in territories of the nature reserve fund); monitoring of waste generation, storage, and disposal sites; monitoring of the impact of genetically modified organisms on the environment; monitoring of the impact of physical factors (temperature, noise, vibration, ionizing and non-ionizing radiation); background environmental monitoring in territories of the nature reserve fund [3].

Materials and methods. The purpose of the study was to analyze the current state of the regulatory framework for creating regional environmental monitoring centers as part of the development of the state environmental monitoring system in Ukraine. It also aimed to review the key provisions of new legislative acts that regulate the creation of regional environmental monitoring centers, the functioning of information systems, and the procedure for collecting and using environmental information. Additionally, the study sought to identify the main shortcomings of the legislative basis and propose directions for its improvement for effective environmental management.

In the course of the research, we used methods of searching, analysis, systematization, and generalization of the regulatory framework concerning the functioning of the environmental monitoring system in Ukraine.

The study was carried out under cooperation agreement No. 41-s of April 24, 2024, between Zaporizhzhia National University and the Department of Environmental Protection of the Zaporizhzhia Regional State Administration. It was also conducted as part of the work of the commission on state monitoring in the field of atmospheric air protec-

tion and air quality management in the Zaporizhzhia zone (Order No. 467 of August 24, 2023).

Results and Discussion. Environmental monitoring is a fundamental element of environmental policy that ensures the validity of management decisions in environmental protection. In the context of Ukraine's post-war recovery, the creation of a modern, effective, and integrated monitoring system that meets both national needs and international obligations becomes of particular importance [4].

Environmental monitoring is regarded as a system of observations of the state of the environment and its components, changes, and forecasts of situation development, as well as the study and analysis of dynamics occurring within it.

At present, the state environmental monitoring system focuses not only on observation and data preservation but also on modelling changes in component quality and forecasting situations – that is, on the active use of accumulated data volumes [5].

In general, the environmental monitoring system can be represented in a hierarchical information pyramid: «data–information–knowledge–wisdom». Each level of the pyramid adds specific properties to the previous one. At the base is the data level; the next level–information–adds context; knowledge is the level of «how», i.e., the mechanism for using the obtained data; finally, wisdom complements the pyramid with the level of «when», i.e., under what conditions the information will be used.

At the legislative level, the concept and organisational structure of the state environmental monitoring system are regulated by a number of relevant normative and legal acts. The key ones include:

1. Law of Ukraine No. 2973-IX of March 20, 2023 «On Amendments to Certain Legislative Acts of Ukraine Regarding the State System of Environmental Monitoring, Information on the State of the Environment (Environmental Information), and Information Support for Environmental Management» [6], which amends certain legislative acts concerning the state system of environmental monitoring and information support for environmental management. This Law shall enter into force six months after the cancellation or termination of martial law introduced by the Presidential Decree of February 24, 2022, No. 64/2022 «On the Introduction of Martial Law in Ukraine».

2. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated June 13, 2024, No. 684 approves the Procedure for the Implementation of State Environmental Monitoring [7].

3. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of July 12, 2024, No. 815 «On information interaction between automated information systems of state authorities and the nationwide environmental automated information and an analytical system for ensuring management decision-making and access to environmental information and its network» [8], which regulates the procedure for information exchange.

4. Order of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine dated December 23, 2024, No. 1720 [9], which approves the Procedure for Establishing Regional Environmental Monitoring Centres.

Conceptually, the task of data collection and ensuring the functioning of the observation network is entrusted to regional environmental monitoring centres.

5. The Order of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine No. 230 of February 6, 2025 [10], which approves the model regulation on regional environmental monitoring centres. This document defines the basic principles of their activities, functions, structure, and subordination.

Key aspects of Order No. 230 include the establishment of regional environmental monitoring centres to systematically monitor, analyse, and assess the environmental conditions in the regions of Ukraine. These centres are designed to detect negative environmental changes promptly and to facilitate informed management decisions. Among their main functions are the collection and processing of environmental data, laboratory research, database creation, analytical reporting, and providing information to state authorities and local self-government bodies.

The centres can be established as separate legal entities or as structural subdivisions of existing institutions. They are subordinate to the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine, or to the relevant regional state administrations.

The approval of this provision is an important step in building a national environmental monitoring system, which will contribute to strengthening environmental control and ensuring ecological safety in Ukraine.

At the same time, the future of the Concept of the State Targeted Environmental Program for Environmental Monitoring, approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 610-r of July 7, 2023 [11], remains uncertain. The Ministry of Environmental Protection and Natural Resources was designated as the customer of the Program, yet its development also depends on the termination or cancellation of martial law.

Despite progress and positive intentions, several key shortcomings and missing elements can be identified in all the above-mentioned documents, which may hinder the effective functioning of the environmental monitoring system. Despite progress and positive intentions, several key shortcomings and missing elements in the above documents may hinder the effective functioning of the environmental monitoring system [12]:

1. Lack of funding mechanisms: the documents do not identify stable funding sources for monitoring, which may lead to insufficient resources. It is noted that funding from the state budget is possible only if explicitly allocated, taking into account the peculiarities of post-war planning and financing. The risk lies in inconsistent prioritisation at the regional level.

2. Lack of monitoring standards and methodologies. There are no unified monitoring standards and methodologies, which may result in data inconsistency and incomparability. There is also an absence of forecasting methodologies and health/environmental impact assessment techniques.

3. Lack of clear technical requirements. The documents do not define specific standards and requirements used

for air quality monitoring, which may affect the accuracy and comparability of the data.

4. Lack of clear performance evaluation criteria: regulatory acts do not establish specific indicators and criteria for assessing the effectiveness and efficiency of the environmental monitoring system.

5. Limited public access to information. The law does not ensure full and timely public access to environmental information, which contradicts the principles of transparency and openness.

6. Insufficient integration with international systems. This limits the ability to exchange data and experiences. For example, a comprehensive air quality monitoring network operated in the Donetsk region until 2022, but its data were not transferred to the European system due to a lack of verification.

Therefore, the pressing unresolved issues regarding the functioning of the environmental monitoring system, as shown in Table 1, remain relevant.

The unresolved issues concerning the financing of the environmental monitoring system are presented in Table 2.

Therefore, proposals for improving the regulatory framework for the functioning of the environmental monitoring system in the post-war period are as follows:

1. Develop a clear hierarchy and distribution of powers among the bodies responsible for environmental monitoring to avoid conflicts and increase efficiency. This will ensure that funding for environmental monitoring is mandatory.

2. Create a financial model with mandatory budgeting. A targeted state program for environmental monitoring should become this model.

3. Develop unified technical standards, observation methodologies, and information exchange protocols that

will meet international requirements and ensure data reliability and comparability. Unified information exchange protocols are needed to integrate the national system into international information networks.

4. Mandate the publication of monitoring data in open access. Enshrine in law a provision for the mandatory publication of monitoring results in open access and create mechanisms to involve the public in the process of assessing the state of the environment.

5. Develop a system of indicators to evaluate monitoring effectiveness. A system of indicators is needed that will allow for the timely detection and elimination of shortcomings in the overall functioning of the monitoring system.

6. Ensure the conduct of applied scientific research to provide scientific support for the functioning and improvement of the monitoring system.

Conclusions. The effective functioning of the environmental monitoring system, especially at the regional level during the post-war period, requires substantial improvements to the regulatory framework and organisational mechanisms. To conduct state monitoring effectively at the regional level and achieve its desired results, it is necessary to develop legal acts that clearly regulate the hierarchy and delineation of powers between the bodies involved in environmental monitoring. This will help avoid duplication of functions, reduce the risks of inter-agency conflicts, and ensure guaranteed funding for monitoring activities.

Establishing a state target program as a financial model will ensure mandatory budget allocation for monitoring activities, increase their effectiveness, and ensure the continuity of information accumulation within the framework of state monitoring.

Table 1

Unregulated Aspects of the Environmental Monitoring System and Official Position of the Ministry of Environmental Protection (as of 2025)

Unregulated Issues	Position of the Ministry of Environmental Protection	As of 2025
Requirements for the structure, software and hardware complex, information security levels, etc.	The structure of the regional environmental monitoring center should be determined individually, depending on the needs of each specific regional environmental monitoring center. They will be approved by separate Cabinet of Ministers of Ukraine resolutions for each subsystem.	The current legal and regulatory acts (the Procedure for Creation, the Regulation) do not provide for regulation by separate Resolutions.
Requirements for the level of information security and the software and hardware complex against unauthorized access.	Information security requirements are stipulated by other legislative and regulatory acts, specifically the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 373 dated March 29, 2006, «On the Approval of the Rules for Ensuring Information Security in Information, Electronic Communication, and Information and Communication Systems» (as amended).	The legal and regulatory act that specifies information security requirements is not cited.
The need for standardized software to process the data obtained, as well as corresponding analytical, predictive, mathematical, and statistical models, along with standardized data exchange protocols, and so on.	Procedures for ensuring the technological compatibility and information interaction between the automated information system (AIS) and the national environmental automated information and analytical system (for supporting management decision-making and providing access to environmental information and its network) will be approved by separate resolutions of the Cabinet of Ministers of Ukraine (CMU) for each subsystem.	There are no separate legal and regulatory acts for the subsystems

Legal and Organisational Gaps in Funding Mechanisms for Regional Environmental Monitoring Centres

Unregulated Issues	Position of the Ministry of Environmental Protection	As of 2025
A regional environmental monitoring center can be established as a communal enterprise, which is subordinate, accountable, and controlled by the relevant regional council and, based on its sectoral focus, is under the authority of the environmental protection department of the regional state administration.	A regional environmental monitoring center is: - a structural unit for environmental protection issues of the regional state administration... - or an enterprise, institution, or organization that falls under the management of the Autonomous Republic of Crimea, the regional council, or the territorial community of the city of Kyiv...	Conducting environmental monitoring, carrying out analysis, and providing the necessary technical support and maintenance for automated monitoring systems will require organizational and financial support.
The Chairman of the regional, Kyiv, and Sevastopol city councils approves the organizational and logistical support, staffing table, and the budget of revenues and expenditures for the maintenance of the regional environmental monitoring center.	The clause states: «The work of the regional monitoring center is funded by state budget funds and other sources not prohibited by law».	Article 22 of the Law of Ukraine «On Environmental Protection» (in the wording of Law No. 2973) stipulates: «The financing of the state environmental monitoring system and its subsystems is carried out using funds from the state and local budgets, as well as other sources not prohibited by law».
The work of regional environmental monitoring centers should be funded by regional (local) budget funds, specifically from the regional environmental protection fund and other sources not prohibited by law.	Overall, it was excluded in order to take into account the remarks from the Ministry of Agrarian Policy and Food, the StateGeoCadastre, the Ministry of Finance, and the Association of District and Regional Councils.	The issue of funding remains unresolved.

A key area for improvement is the standardization of the technical and methodological framework for monitoring. The development of unified standards, methodologies, monitoring programs, and data exchange protocols, aligned with international requirements, will ensure the reliability of environmental information and the comparability and compatibility of data from all entities of state environmental monitoring. In turn, this data standardization will facilitate the integration of the national system into international information networks.

Furthermore, the improvement of the monitoring system requires the development of indicators to assess its effectiveness and the implementation of mechanisms for scientific support. Applied research will enable the development of new monitoring methods and technologies, identify problematic aspects promptly, and adapt the system to new challenges.

The combination of these measures ensures the creation of a holistic, transparent, and effective environmental monitoring system that can support the country's environmental recovery in the post-war period.

Література:

1. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII. *Відомості Верховної Ради України*. 1991. № 41. Ст. 546. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text> (дата звернення: 04.09.2024).
2. Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля : постанова Кабінету Міністрів України від 30.03.1998 № 391. *Офіційний вісник України*. 1998. № 13. С. 60. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/391-98-п#Text> (дата звернення: 04.09.2024).
3. Моніторинг довкілля. Аналітична записка щодо стану та перспектив розвитку державної системи моніторингу довкілля. Київ, 2023. 119 с. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/02/Monitoring-Green-Paper_15_02_2022.pdf (дата звернення: 04.09.2024).
4. Belokon K., Malovanyu M., Proskurnin O. The Improvement of the Automated Monitoring System for Atmospheric Air Quality in the City of Zaporizhzhia. *Екологічні науки*. 2024. № 5(56). С. 263-268. URL: <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2024/5/41.pdf>, <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.5-56.39>
5. Андрієнко М.В., Шако В.С. Стан і проблеми функціонування системи моніторингу довкілля у сфері реалізації державної екологічної політики. *Інвестиції: практика та досвід*. 2017. № 17. С. 75-81.
6. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо державної системи моніторингу довкілля, інформації про стан довкілля (екологічної інформації) та інформаційного забезпечення управління у сфері довкілля : Закон України від 20.03.2023 № 2973-IX. *Відомості Верховної Ради України*. 2023. № 20. Ст. 74. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2973-20#Text> (дата звернення: 04.08.2025).
7. Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря : Постанова Кабінету Міністрів України від 13.06.2024 № 684. *Офіційний вісник України*. 2024. № 51. С. 101. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/684-2024-п> (дата звернення: 04.08.2025).

8. Про інформаційну взаємодію між автоматизованими інформаційними системами органів державної влади та загальнодержавною екологічною автоматизованою інформаційно-аналітичною системою забезпечення прийняття управлінських рішень та доступу до екологічної інформації та її мережі : Постанова Кабінету Міністрів України від 12.07.2024 № 815. *Офіційний вісник України*. 2024. № 61. Ст. 3676. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/815-2024-p> (дата звернення: 04.08.2025).

9. Про затвердження Порядку створення регіональних центрів моніторингу довкілля : Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 23.12.2024 № 1720. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0156-25#Text> (дата звернення: 04.08.2025).

10. Про затвердження Примірного положення про регіональні центри моніторингу довкілля : Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 06.02.2025 № 230. URL: <https://mepr.gov.ua/nakaz-mindovkilliya-230-vid-06-02-2025/> (дата звернення: 04.08.2025).

11. Про схвалення Концепції Державної цільової екологічної програми моніторингу довкілля : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 07.07.2023 № 610-р. *Офіційний вісник України*. 2023. № 68. Ст. 3912. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/610-2023-%D1%80#Text> (дата звернення: 04.09.2025).

12. Пірогова І.М., Белоконь К.В. Проблемні питання нормативно-правової бази функціонування регіональних центрів моніторингу довкілля у повоєнний період. У кн.: Стратегія якості в промисловості і освіті: матеріали XIX Міжнар. конф. Електрон. вид. Дніпро : Журфонд, 2025. 487 с. С. 449–453. URL: <https://drive.google.com/file/d/1YxQzufSy0JdBTnWRTTrLFxXEYTGn5k8qw/view>

References:

1. Pro okhoronu navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha: Zakon Ukrainy No. 1264-XII. (1991). [On environmental protection: Law of Ukraine No. 1264-XII]. [Electronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text> (access date 04.09.2024) [in Ukrainian].

2. Pro zatverdzhennia Polozhennia pro derzhavnu systemu monitorynhu dovkillia: Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 30.03.1998 No. 391 [On the Approval of the Regulation on the State Environmental Monitoring System: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 30.03.1998 No. 391]. (1998). *Ofitsiynyi visnyk Ukrainy*, (13), 60. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/391-98-p#Text> (access date 04.09.2024) [in Ukrainian].

3. Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy. (2023). Monitorynh dovkillia. Analychna zapyska shchodo stanu ta perspektyv rozvytku derzhavnoi systemy monitorynhu dovkillia [Environmental monitoring. Analytical note on the state and prospects of the development of the state environmental monitoring system]. [Electronic resource] URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/02/Monitoring-Green-Paper_15_02_2022.pdf (access date 04.09.2024) [in Ukrainian].

4. Belokon, K., Malovanyy, M., Proskurnin, O. (2024). The Improvement of the Automated Monitoring System for Atmospheric Air Quality in the City of Zaporizhzhia. *Ekolohichni nauky* [Ecological Sciences]. [Electronic resource] URL: <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2024/5/41.pdf> (access date 04.09.2024) [in Ukrainian].

5. Andriienko, M.V., Shako, V.S. (2017). Stan i problemy funktsionuvannia systemy monitorynhu dovkillia u sferi realizatsii derzhavnoi ekolohichnoi polityky [The state and problems of the functioning of the environmental monitoring system in the field of implementing state environmental policy]. *Investysii: praktyka ta dosvid*, (17), 75-81. URL: <https://www.link-assistant.com/seo-wiki/not-provided/> [in Ukrainian].

6. Pro vnesennia zmin do deiakykh zakonodavchykh aktiv Ukrainy shchodo derzhavnoi systemy monitorynhu dovkillia, informatsii pro stan dovkillia (ekolohichnoi informatsii) ta informatsiinoho zabezpechennia upravlinnia u sferi dovkillia: Zakon Ukrainy vid 20.03.2023 № 2973-IX [On amendments to certain legislative acts of Ukraine regarding the state environmental monitoring system, information on the state of the environment (environmental information) and information support for management in the field of the environment]. [Electronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2973-20#Text> (access date 04.08.2025) [in Ukrainian].

7. Kabinet Ministriv Ukrainy (2024). Pro zatverdzhennia Poriadku zdiisnennia derzhavnoho monitorynhu v haluzi okhorony atmosfernoho povitria [On the approval of the Procedure for state monitoring in the field of atmospheric air protection]. [Electronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/684-2024-p> (access date 04.08.2025) [in Ukrainian].

8. Kabinet Ministriv Ukrainy (2024). Pro informatsiinu vzaiemodiiu mizh avtomatyzovanyimi informatsiinyimi systemami orhaniv derzhavnoi vlady ta zahalnoderzhavnoiu ekolohichnoiu avtomatyzovanou informatsiino-analychnoiu systemoiu [On information interaction between automated information systems of state authorities and the national environmental automated information and analytical system]. [Electronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/815-2024-p> (access date 04.08.2025) [in Ukrainian].

9. Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy (2024). Pro zatverdzhennia Poriadku stvorennia rehionalnykh tsestriv monitorynhu dovkillia [On the approval of the Procedure for the creation of regional environmental monitoring centers]. [Electronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0156-25#Text> (access date 04.08.2025) [in Ukrainian].

10. Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy (2025). Pro zatverdzhennia Prymirnoho polozhennia pro rehionalni tsentry monitorynhu dovkillia [On the approval of the Exemplary Regulation on regional environmental monitoring centers]. [Electronic resource] URL: <https://mepr.gov.ua/nakaz-mindovkilliya-230-vid-06-02-2025/> (access date 04.08.2025) [in Ukrainian].

11. Kabinet Ministriv Ukrainy (2023). Pro skhvalennia Kontseptsii Derzhavnoi tsilovoi ekolohichnoi prohramy monitorynhu dovkillia [On the approval of the Concept of the State targeted environmental monitoring program]. [Electronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/610-2023-%D1%80#Text> (access date 04.09.2025) [in Ukrainian].

12. Pirohova, I. M., & Bielokon, K. V. (2025). Problemni pytannia normatyvno-pravovoi bazy funktsionuvannia rehionalnykh tsestriv monitorynhu dovkillia u poviennyi period [Problematic issues of the regulatory and legal framework for the functioning of regional environmental monitoring centers in the post-war period]. [Electronic resource] URL: <https://drive.google.com/file/d/1YxQzufSy0JdBtNWRTrLFxXEYTGn5k8qw/view> (access date 04.09.2025) [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 26.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025

БІОІНДИКАЦІЙНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ҐРУНТОВИХ БЕЗХРЕБЕТНИХ В ЕКОСИСТЕМАХ ІЗ РІЗНИМ РІВНЕМ АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Бусленко Леся Володимирівна,

кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри зоології, факультету біології та лісового господарства
Волинського національного університету імені Лесі Українки
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4626-9019>

Теплюк Вадим Сергійович,

кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри зоології, факультету біології та лісового господарства,
Волинського національного університету імені Лесі Українки
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0611-2797>

Іванців Володимир Васильович,

доктор біологічних наук, професор, професор кафедри зоології, факультету біології та лісового господарства
Волинського національного університету імені Лесі Українки
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8715-9529>

У статті наведено результати дослідження біоіндикаційної ефективності ґрунтових безхребетних у межах чотирьох типів екосистем із різним рівнем антропогенного навантаження (умовно-природна, агроекосистема, урбанізована, техногенна), розташованих у межах Волинської області. Умовно-природна ділянка (Ботанічний заказник загальнодержавного значення «Воротнів» поблизу м. Луцьк) характеризувалася найвищими значеннями показників: чисельність мезофауни становила 1212 екз./м², кількість таксонів – 14, індекс Шеннона – 2,18, індекс домінування Сімпсона (D) – 0,87. У техногенній зоні (промислова територія поблизу ПрАТ «Цумань» у селищі Цумань) чисельність мезофауни знижувалася до 528 екз./м², що відображає істотне зменшення біотичного різноманіття внаслідок деградаційних змін ґрунтового середовища. В агроекосистемі (сільськогосподарські угіддя поблизу села Гірка Полонка) та урбанізованій зоні (зелена смуга центральної частини м. Луцьк) чисельність фауни становила 662 та 734 екз./м², а кількість таксонів – 10 та 9, відповідно. Індекси різноманіття знижувалися за градієнтом порушення: H' змінювався від 2,18 (природна) до 1,12 (техногенна); D – від 0,87 до 0,53. Виявлено сильну позитивну кореляцію між чисельністю безхребетних і вмістом органічної речовини ($R^2 = 0,952$), що вказує на трофічну зумовленість формування угруповань. У стабільних умовах домінували Oribatida, Collembola і Lumbricidae, у техногенній – Collembola (43 %) і Gamasina (31 %), що вказує на домінування пластичних, швидко репродуктивних форм із коротким життєвим циклом. Умовно-природну ділянку характеризувала висока частка сапротрофних форм (сукупно понад 70 %), тоді як у трансформованих екосистемах зростала частка евритопних груп, зокрема мікрофагів із широким екологічним діапазоном. Результати дослідження підтверджують високу чутливість структури мезофауни до антропогенного пресу та обґрунтовують доцільність її використання як надійного індикатора в рамках біомоніторингу для екологічної діагностики ґрунтів, що зазнають техногенного впливу різної інтенсивності.

Ключові слова: мезофауна, біоіндикація, трофічна структура, біомоніторинг, екологічна діагностика, ґрунт.

Buslenko Lesia, Tepluk Vadym, Ivantsiv Volodymyr. Bioindicative Efficiency of Soil Invertebrates in Ecological Systems with Different Levels of Anthropogenic Load

The article presents the results of a study on the bioindicative efficiency of soil invertebrates across four types of ecosystems with varying degrees of anthropogenic pressure (quasi-natural, agroecosystem, urban, and technogenic) located within the Volyn region (Ukraine). The quasi-natural site (Vorotniv tract near Lutsk) exhibited the highest ecological indicators: mesofauna density reached 1212 specimens/m², species richness comprised 14 taxa, the Shannon diversity index was 2.18, and the Simpson index ($1 - D$) was 0.87. In the technogenic zone (industrial area near PJSC "Tsuman" in the village of Tsuman), the mesofauna density decreased to 528 individuals/m², indicating a significant reduction in biotic diversity as a result of soil environment degradation. In the agroecosystem (agricultural lands near the village of Hirka Polonka) and urban site (a green zone in downtown Lutsk), mesofauna densities were 662 and 734 specimens/m², and species richness amounted to 10 and 9 taxa, respectively. Diversity indices declined along the disturbance gradient: H' decreased from 2.18 to 1.12; D from 0.87 to 0.53. A strong positive correlation was found between mesofauna density and soil organic matter content ($R^2 = 0.952$), highlighting the trophic dependence of community structure. Under stable environmental conditions, Oribatida, Collembola, and Lumbricidae were dominant, whereas in the technogenic site Collembola (43%) and Gamasina (31%) prevailed, indicating the dominance of plastic, rapidly reproducing forms with short life cycles. The quasi-natural site was characterized by a high proportion of saprotrophic forms (collectively over 70%), while in transformed ecosystems, the share of eurytopic groups increased, particularly microphages with a broad ecological tolerance. The results confirm the high sensitivity of soil mesofauna structure to anthropogenic stress and justify its application as a reliable indicator within the framework of biomonitoring for ecological diagnostics of grounds experiencing technogenic impact of varying intensity.

Key words: mesofauna, bioindication, trophic structure, biomonitoring, ecological diagnostics, soil.

Вступ. Ґрунтові екосистеми швидко реагують на зміни абіотичних і біотичних чинників, зумовлені антропогенним впливом. Структурні та функціональні характеристики ґрунтової фауни, зокрема безхребетних, можуть змінюватися під впливом забруднення, ущільнення, ерозійних процесів і деградації органічної речовини. Тому склад і чисельність ґрунтових безхребетних розглядаються як інформативні показники для оцінювання екологічного стану середовища [12; 19].

Підходи до використання біоти як індикатора екологічних умов були закладені ще в межах ґрунтової зоології середини ХХ століття. Подальші дослідження довели, що ґрунтові безхребетні – зокрема представники мезофауни – мають високу чутливість до змін у трофічній структурі, вологості, хімічному складі субстрату, що робить їх зручними для індикації локальних екосистемних змін [2; 8]. Особливо це стосується техногенно трансформованих територій і урбанізованих ландшафтів, де класичні фізико-хімічні методи не завжди забезпечують комплексне уявлення про стан ґрунтів.

Результати вітчизняних емпіричних досліджень демонструють стабільну залежність між структурою ґрунтових угруповань і ступенем антропогенного навантаження [3; 8]. Найбільші зміни спостерігаються в чисельності та видовому складі окремих груп ентомобій, олігохет, ізопод та колембол. Водночас результати багатьох досліджень залишаються фрагментарними, що ускладнює формування єдиної системи критеріїв біоіндикації для різних типів ландшафтів. Методичні матеріали, які використовуються у вищій освіті, формують загальні уявлення про підходи до біоіндикації [1; 7], однак не завжди охоплюють кількісні аспекти та типологічну специфіку ґрунтових безхребетних у регіональному контексті.

У зарубіжній практиці біоіндикація за участю безхребетних давно використовується як метод екологічної діагностики ґрунту в урбанізованих, промислових та аграрних зонах [13; 19]. Узагальнення даних про таксономічні групи біоіндикаторів дозволяє ідентифікувати найбільш інформативні групи для цілей біомоніторингу [13, с. 833–834]. Дослідження демонструють тісний зв'язок між видовим складом ґрунтових угруповань і фізико-хімічними характеристиками субстрату, зокрема концентрацією важких металів, рН, вмістом органічної речовини тощо [12; 21]. У міжнародних дослідженнях особливу увагу приділено також використанню біомаркерів – молекулярних і фізіологічних індикаторів впливу забруднювачів [12; 21], що дозволяє виявити деградаційні процеси ще до появи видимих змін у структурі біоти.

Однак і в міжнародному, і у вітчизняному контексті залишається недостатньо дослідженою ефективність біоіндикації в умовах градієнтного антропогенного навантаження, тобто за умов плавної зміни ступеня впливу в межах одного географічного регіону. Відсутність єдиного підходу до кількісної оцінки індикаторного значення окремих груп ускладнює впровадження зооіндикації як стандартного моніторингового інструменту в локальних екосистемах.

Метою дослідження є кількісне оцінювання інформативності основних таксономічних груп ґрунтових безхребетних як біоіндикаторів стану ґрунтів за умов варіативного антропогенного впливу.

Матеріали і методи. Польові дослідження виконувались з березня по листопад 2023 – 2024 років на території Волинської області, в межах лісостепової природної зони, що зумовлено сезонною активністю ґрунтових безхребетних. Ділянки дослідження розташовувалися на чотирьох типових ландшафтних комплексах, що відрізняються інтенсивністю антропогенного навантаження. Агроекосистема охоплювала сільськогосподарські угіддя поблизу села Гірка Полонка, де фіксується тривале застосування мінеральних добрив. Урбанізована територія включала зелену смугу в центральній частині міста Луцька, що зазнає високого техногенного тиску. Умовно-природна ділянка розташовувалась у Ботанічному заказнику загальнодержавного значення «Воротнів», яке зберігає мозаїчну структуру корінних дубово-грабових лісів. Техногенна ділянка розташовувалась у зоні впливу деревообробного підприємства Приватного акціонерного товариства «Цумань» (ПрАТ «Цумань») поблизу селища Цумань Волинської області, яке є джерелом хронічного забруднення ґрунтового середовища внаслідок тривалої діяльності з переробки деревини. Просторове розташування об'єктів і міжпунктові відстані наведено на картосхемі, що дозволяє оцінити регіональну однорідність умов і географічну обґрунтованість вибору ділянок (рис. 1). Вибір зазначених локалітетів зумовлювався необхідністю здійснення цілеспрямованого біомоніторингу ґрунтової мезофауни з метою екологічної діагностики ґрунтів у межах одного природного регіону. Такий підхід забезпечував можливість просторового порівняння стану екосистем без впливу кліматичних або геохімічних відмінностей. Вміст органічної речовини у ґрунті визначався за ДСТУ 4287:2004 [4] для кожної ділянки за результатами лабораторного аналізу проб.

Відбір ґрунтових проб проводився у фазу максимального сезонного розвитку фауни. Стандартні моноліти розміром 25×25 см і глибиною 10 см відбиралися вручну відповідно до вимог ДСТУ ISO 10381-6:2004 [5] з інтервалом не менше 5 м між точками. На кожній ділянці відбирали по 10 монолітів, що дозволяло охопити мікрогетерогенність ґрунтових умов у межах заданої території. Зібраний матеріал фіксувався в 70% етанолі, після чого проводилася таксономічна обробка в лабораторних умовах. Кількісні та якісні показники фауни усереднювалися для кожної ділянки з подальшим розрахунком середніх значень та стандартних відхилень.

Ідентифікацію ґрунтових безхребетних здійснювали до рівня роду або виду за допомогою мікроскопа XS-5520 LED MICRO med із використанням таксономічних визначників, адаптованих до відповідних груп: для Collembola – за спеціалізованим зведенням [18], для Oribatida – за атласом і визначником [20], а також профільним томом серії «Фауна України» [6]. Вибіркове зіставлення окремих таксонів флори та фауни здійсню-



Рис. 1. Географічне розташування досліджуваних пунктів і міжпунктові відстані у межах Волинської області

валосся на основі сучасних джерел, що поєднують морфологічну ідентифікацію та фітоіндикаційні підходи з урахуванням регіонального представництва [1; 3; 7].

Біометричні показники включали чисельність, відносне домінування та видовий склад (S). Для оцінки різноманіття використовувались також індекси Шеннона та Симпсона – у випадках з достатньою таксономічною насиченістю. Усі розрахунки проводились у перерахунку на 1 м². Лабораторна обробка біологічного матеріалу, таксономічна ідентифікація організмів і розрахунок біоіндикаційних показників здійснювались на базі лабораторії «Фауни і систематики безхребетних тварин біоценозів західного Полісся» та лабораторії «Олігохетології» кафедри зоології факультету Біології та лісового господарства Волинського національного університету імені Лесі Українки.

Статистична обробка даних виконувалась у середовищі PAST 4.03. Для перевірки достовірності різниць використовували дисперсійний аналіз (ANOVA), а для встановлення взаємозв'язків між абіотичними показниками та структурою угруповань – кореляційний аналіз за коефіцієнтом Спірмена (ρ). Статистичну значущість визначала межа $p < 0,05$.

Результати. Угруповання ґрунтових безхребетних, сформовані в межах чотирьох типів екосистем, виявили чітку градацію чисельності та видового складу відповідно до ступеня антропогенного навантаження. Природна лісопаркова ділянка демонструвала найбільш стабільну структуру, тоді як техногенна зона характеризувалась спрощенням фауни та зниженням показників різноманіття. Агроекосистема й урбанізоване середовище займали проміжне положення. Отримані кількісні характеристики систематизовано в таблиці 1.

Значення загальної чисельності мезофауни варіювали від 1212 екз./м² на умовно-природній ділянці до 528 екз./м² у техногенній зоні, що свідчить про сильну залежність фауни від стану ґрунтового середовища. Висока щільність у лісопарковій зоні вказує на сприятливі гідротермічні умови, наявність стабільного органічного шару та низький рівень механічних порушень. Навпаки, зменшення чисельності в техногенній зоні пов'язане з високим рівнем хімічного навантаження, ущільненням ґрунту й зниженням вмісту органічної речовини, що обмежує доступну екологічну нішу для більшості таксонів [14; 17]. Високі показники індексів Шеннона ($H' = 2,18$) і Симпсона ($D = 0,87$) у природній ділянці підтверджують складну трофічну та просторову структуру спільноти з рівномірним розподілом чисельності між таксонами. Зниження H' до 1,12 і D до 0,53 у техногенній зоні свідчить про різке спрощення структури угруповання, зростання домінування кількох евритопних груп і втрату регіонально характерного різноманіття [10; 15; 18]. Урбанізована територія (734 екз./м²) та агроекосистема (662 екз./м²) демонстрували проміжні значення, що є наслідком збереження фрагментів природної фауни поряд із формуванням вторинних, толерантних до порушень елементів. Ці показники засвідчують, що інтенсивність антропогенного пресу безпосередньо впливає на склад, функціонування та стійкість ґрунтових біоценозів.

Структура домінування ґрунтових безхребетних на досліджених ділянках виявила суттєві відмінності, що узгоджується з характером трансформації екосистем. Склад угруповань змінювався не лише за чисельністю та кількістю таксонів, а й за співвідношенням домінуючих груп. Аналіз відносної чисельності найбільш

Загальні характеристики ґрунтової мезофауни на досліджених ділянках

Ділянка (тип і розташування)	Чисельність (екз./м ²)	Кількість таксонів (S)	Індекс Шеннона (H')	Індекс Симпсона (D)
Ботанічний заказник загальнодержавного значення «Воротнів» (умовно-природна)	1212	14	2,18	0,87
Сільськогосподарські угіддя поблизу с. Гірка Полонка (агроєкосистема)	662	10	1,79	0,75
Зелена зона центральної частини м. Луцьк (урбанізована ділянка)	734	9	1,68	0,70
Промислова зона поблизу ПрАТ «Цумань» (техногенна ділянка)	528	7	1,12	0,53

поширених таксонів дозволив виявити типові для кожного середовища профілі домінування, які відображають екологічну стабільність або, навпаки, ступінь порушення ґрунтової системи. У таблиці 2 представлено відносну чисельність (% від загального складу) п'яти основних груп мезофауни, що формують ядро структури угруповань на кожній із досліджених територій. Показники розраховано за допомогою коефіцієнта домінування.

Таксономічна структура угруповань ґрунтових безхребетних відзначалась значною варіативністю між дослідженими ділянками, що зумовлено різною інтенсивністю антропогенного навантаження. В умовно-природній екосистемі переважали представники ряду Oribatida (28 %) та класу Collembola (26 %). Орібатидні кліщі характеризуються низькою толерантністю до порушення ґрунтової структури та високою залежністю від стабільного гідротермічного режиму, що робить їх індикаторами екологічної стабільності. Ентомобрії ж включають як чутливі до порушень форми, так і пластичні види, проте їхня висока частка свідчить про наявність умов, сприятливих для ґрунтової мезофауни з різними адаптивними стратегіями. На агроєкосистемній ділянці домінування зміщується в бік ентомобрії Collembola (33 %) та кліщів Oribatida (30 %), що типово для середовищ із регулярним механічним обробіткою, помірним вмістом органічної речовини та підвищеною флуктуацією мікрокліматичних показників, які зберігають сприятливі умови для частини редуцентної мезофауни. Урбанізована територія виявила найбільшу рівномірність у домінуванні між основними групами –

орібатидними кліщами (Oribatida – 27 %), ентомобріями (Collembola – 24 %) та ізоподами (Porcellio – 20 %), що відображає фрагментований характер середовища з мозаїчністю мікробіотопів, де зберігаються локальні осередки фауни з різним ступенем екологічної стійкості [13, с. 842]. Найбільш спрощене угруповання виявлено в техногенній зоні, де понад 70 % усієї фауни формували два доміанти: ентомобрії (Collembola – 43 %) і гамазові кліщі (Gamasina – 31 %), що свідчить про високий рівень екологічного стресу та переважання пластичних, швидко адаптивних форм, здатних до ефективної колонізації нестабільних субстратів [9, с. 62]. Переважання Collembola і Gamasina в техногенній зоні відображає не лише високий адаптивний потенціал цих груп, але й функціональне спрощення ґрунтової екосистеми, в якій редукторні, трофічні та біотурбуючі функції концентруються у вузькому колі неспеціалізованих таксонів з r-стратегією розвитку [11, с. 4–5]. Це зменшує здатність ґрунтових угруповань до регенерації після порушень і послаблює трофічну цілісність біоценозу. Така структура домінування вказує на зміну трофічного профілю та зменшення кількості екологічно спеціалізованих видів у напрямку зростання техногенного пресу.

З метою оцінки впливу абіотичних чинників на структурні параметри мезофауни було проведено кореляційний аналіз між вмістом органічної речовини в ґрунті та чисельністю ґрунтових безхребетних. Встановлено чітку позитивну залежність між цими показниками: зі зростанням вмісту органіки зростала й щільність фауни. Лінійна регресія описується рівнянням $y = 183,99x + 213,62$, з високим коефіцієнтом детермінації

Таблиця 2

Відносна чисельність основних груп ґрунтової мезофауни на досліджених ділянках за коефіцієнтом домінування

Таксон	Ботанічний заказник загальнодержавного значення «Воротнів» (умовно-природна)	Сільськогосподарські угіддя поблизу с. Гірка Полонка (агроєкосистема)	Зелена зона центральної частини м. Луцьк (урбанізована ділянка)	Промислова зона поблизу ПрАТ «Цумань», (техногенна ділянка)
Lumbricidae	21	12	11	7
Collembola	26	33	24	43
Oribatida	28	30	27	14
Porcellio	17	9	20	5
Gamasina	8	16	18	31
	100	100	100	100

($R^2 = 0,952$) та статистично значущим рівнем достовірності ($p = 0,023$). Це підтверджує тісний функціональний зв'язок між трофічною базою ґрунту та кількісною структурою мезофауни.

На рисунку 2 зображено середні значення чисельності безхребетних для кожної з досліджених ділянок залежно від вмісту органічної речовини, з побудовою лінії регресії. Точки позначено відповідними підписами для візуального зіставлення просторового розташування спостережень.

Візуальний аналіз графіка підтверджує, що найвищу чисельність фауни спостерігали на лісопарковій ділянці, яка характеризувалася максимальним вмістом органічної речовини (5,1 %). Водночас найнижча щільність – у техногенній зоні (1,4 % органіки), що узгоджується з екологічним уявленням про деградацію біоценозу внаслідок виснаження гумусного горизонту [19, с. 8]. Агроєкосистема й урбанізована територія продемонстрували проміжні значення як за органікою, так і за чисельністю, що свідчить про часткове збереження

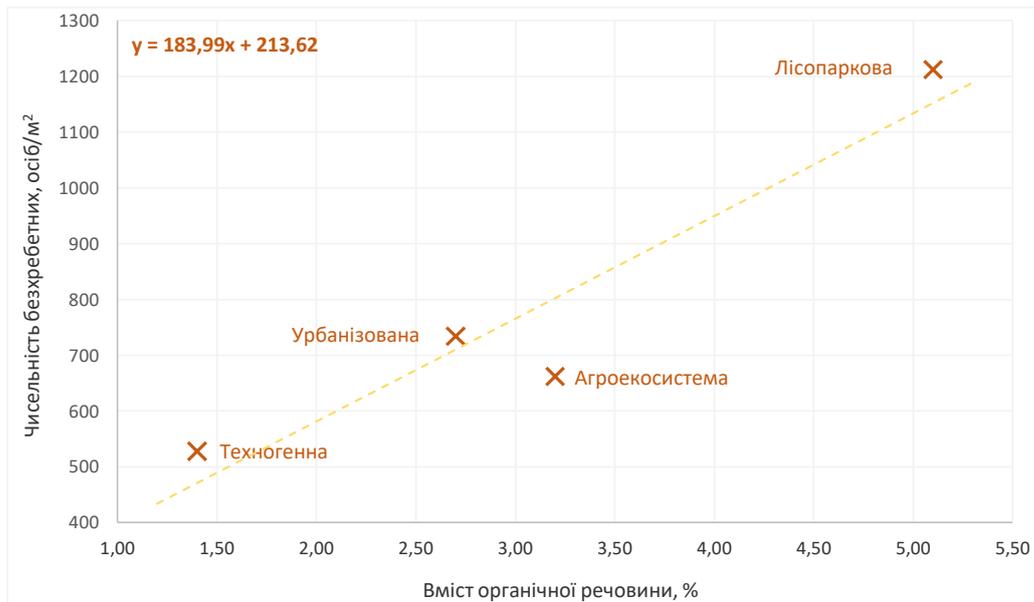


Рис. 2. Залежність чисельності ґрунтових безхребетних від відсоткового вмісту органічної речовини у ґрунті

трофічної бази фауни. Органічна речовина відіграє визначальну роль у формуванні чисельної структури ґрунтових угруповань і може розглядатися як чутливий екологічний предиктор біологічної активності ґрунтів [16, с. 115].

Результати дослідження виявили послідовну трансформацію структури ґрунтових угруповань безхребетних уздовж градієнта антропогенного навантаження [17, с. 176]. Чисельність, видовий склад і індекси різноманіття виявили максимальні значення на умовно-природній ділянці та мінімальні – в техногенній зоні. Домінування окремих евритопних груп і зниження рівномірності в техногенних умовах підтверджують спрощення трофічної структури біоценозу. Виявлена позитивна залежність чисельності мезофауни від вмісту органічної речовини свідчить про ключову роль трофічних ресурсів у підтриманні екологічної стабільності ґрунтів. Загалом, інтеграція кількісних, таксономічних та функціональних параметрів дозволяє розглядати ґрунтову мезофауну як ефективний індикатор екосистемних змін у середовищах з різним рівнем антропогенного впливу.

Висновки. Результати дослідження свідчать про тісний зв'язок між ступенем антропогенного наванта-

ження та біоіндикаційними характеристиками ґрунтових безхребетних. Умовно-природна ділянка характеризувалася найвищими показниками: чисельність мезофауни сягала 1212 екз./м², індекс Шеннона – 2,18, індекс Симпсона – 0,87. Натомість у техногенній зоні ці значення знижувались відповідно до 528 екз./м², 1,12 та 0,53. Встановлено позитивну кореляцію чисельності безхребетних із вмістом органічної речовини ($R^2 = 0,952$), що підкреслює ключову роль трофічного ресурсу у формуванні ґрунтових угруповань. Структура домінування свідчила про зменшення частки спеціалізованих таксонів (Lumbricidae, Porcellio, Oribatida) та переважання толерантних форм (Collembola, Gamasina) за умов забруднення й порушення ґрунтового середовища. Отримані дані узгоджуються з результатами інших досліджень і підтверджують ефективність використання комплексних зоологічних показників як чутливих індикаторів екологічного стану ґрунтів різного типу землекористування. У подальших дослідженнях доцільно розширити спектр моніторингових ділянок, залучити сезонну динаміку та оцінити чутливість мезофауни до інтегрованих факторів забруднення, зокрема у поєднанні хімічного, фізичного та біологічного навантаження.

Література:

1. Горова А.І., Павличенко А.В., Борисовська О.О., Грунтова В.Ю. та ін. Біоіндикація: методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт студентами напряму підготовки 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування». Дніпро : НГУ, 2014. 76 с.
2. Горова А.І. Методологічні аспекти оцінки генетичних наслідків техногенезу. *Екологія і природокористування*, 2001, вип. 3, с. 143–152.
3. Грицак Л.Р., Барна І.М., Кодлюк І.М., Сельська І.І., Сплавінська Ю.Т., Сукар Х.В., Барна С.С. Біоіндикаційні методи для потреб системного аналізу якості довкілля. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Географія*, 2017, вип. 2, с. 153–165.
4. ДСТУ 4287:2004. Грунти. Методи лабораторного визначення показників родючості. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 18 с.
5. ДСТУ ISO 10381-6:2004. Якість ґрунту. Відбір зразків. Частина 6. Керівництво з відбору зразків для оцінювання біологічної активності у ґрунті. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 9 с.
6. Єврюжихіна Г.Я. Кліщі-орібатида (Oribatei). Фауна України. Т. 27, вип. 1. Київ : Наук. думка, 1978. 360 с.
7. Питула Н.М. Фіто- та зооіндикація стану навколишнього середовища. Інституційний репозитарій Запорізького національного університету. URL: <https://dspace.znu.edu.ua/jspui/handle/12345/12902> (дата звернення: 18.06.2025).
8. Сметана О.М., Сметана Н.М. Зооіндикація антропогенного навантаження на степові біоценози Криворіжжя. *Еколого-біологічні дослідження: матеріали наук. конф., Кривий Ріг*, 2002, с. 390–396.
9. Barton P.S., Moir M.L. Invertebrate indicators and ecosystem restoration. In: Lindenmayer D., Barton P. (eds.) *Indicators and surrogates of biodiversity and environmental change*. Amsterdam : Elsevier, 2015, pp. 59–68.
10. Boháč J., Jahnová Z. Land use changes and landscape degradation in central and eastern Europe in the last decades: epigeic invertebrates as bioindicators of landscape changes. In: Kozłowski J. (ed.) *Environmental Indicators*. Dordrecht : Springer, 2015, pp. 395–420. DOI: 10.1007/978-94-017-9499-2_24.
11. Davidson M., Minor M., Todd J. Terrestrial macrofauna invertebrates as indicators of agricultural impacts. AgResearch Ltd., 2024. Available at: https://agresearch.figshare.com/articles/report/Terrestrial_macrofauna_invertebrates_as_indicators_of_agricultural_impacts/26001967?file=46945099
12. Fontanetti C.S., Nogarol L.R., Souza R.D., Perez D.G., Maziviero G.T. Bioindicators and biomarkers in the assessment of soil toxicity. In: Villalobos M. (Ed.), *Soil Contamination*. InTech, 2011, pp. 143–168. DOI: 10.5772/25042.
13. Gerlach J., Samways M., Pryke J. Terrestrial invertebrates as bioindicators: an overview of available taxonomic groups. *Journal of Insect Conservation*, 2013, vol. 17, pp. 831–850. DOI: 10.1007/s10841-013-9565-9.
14. Ghannem S., Bacha O., Fkiri S., Kanzari S., Aydi A., Touaylia S. Soil and sediment organisms as bioindicators of pollution. *Ecologies*, 2024, vol. 5, no. 4, pp. 679–696. DOI: 10.3390/ecologies5040040.
15. Manu M. Soil invertebrates – a useful tool in biomonitoring of heavy metal pollution: a review. *Studia Universitatis Vasile Goldis. Seria Stiintele Vietii (Life Sciences Series)*, 2017, 27(4), pp. 247–258.
16. Medhi J., Dutta J., Kalita M.C. Biomonitoring ecosystem: modelling relationship with environmental factors. In: Das S., Ray S. (Eds.), *Arthropods: Are they beneficial for mankind?* Singapore: Springer, 2021, pp. 113–130.
17. Paoletti M.G. *Invertebrate biodiversity as bioindicators of sustainable landscapes: Practical use of invertebrates to assess sustainable land use*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2012. 460 p.
18. Potapov M.A. *Synopses on Palaearctic Collembola: Volume 3. Isotomidae*. Warszawa: Museum and Institute of Zoology, Polish Academy of Sciences, 2001. 603 p.
19. Santorufu L., Van Gestel C.A., Rocco A., Maisto G. Soil invertebrates as bioindicators of urban soil quality. *Environmental Pollution*, 2012, vol. 161, pp. 57–63. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.09.042.
20. Weigmann G. *Hornmilben (Oribatida)*. In: Dahl F. (Ed.), *Die Tierwelt Deutschlands*, vol. 76. Jena: G. Fischer, 2006. 520 p.
21. Zaghoul A., Saber M., Gadow S., Awad F. Biological indicators for pollution detection in terrestrial and aquatic ecosystems. *Bulletin of the National Research Centre*, 2020, vol. 44, no. 1, pp. 1–11. DOI: 10.1186/S42269-020-00385-X.

References:

1. Horova A.I., Pavlychenko A.V., Borysovska O.O., Hrunтова V.Yu. та ін. (2014). Bioindykatsiia: metodychni rekomendatsii do vykonannya laboratornykh robit studentamy napriamu pidhotovky 6.040106 «Ekolohiia, okhorona navkolyshnoho seredovyshcha ta zbalansovane pryrodokorystuvannya» [Bioindication: methodological guidelines for laboratory work of students majoring in 6.040106 "Ecology, environmental protection and sustainable use of natural resources"]. Dnipro: NHU. 76 p. [in Ukrainian].
2. Horova A.I. (2001). Metodolohichni aspekty otsinky henetychnykh naslidkiv tekhnogenezu [Methodological aspects of assessing genetic consequences of technogenesis]. *Ekolohiia i pryrodokorystuvannya*, (3), 143–152. [in Ukrainian].
3. Hrytsak L.R., Barna I.M., Kodliuk I.M., Selska I.I., Splavinska Yu.T., Sukar Kh.V., Barna S.S. (2017). Bioindykatsiini metody dlia potreb systemnoho analizu yakosti dovkillia [Bioindication methods for systemic analysis of environmental quality]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: Heohrafiia*, (2), 153–165. [in Ukrainian].
4. DSTU 4287:2004. (2005). Hrunt. Metody laboratornoho vyznachennia pokaznykiv rodiuchosti [Soil. Methods of laboratory determination of fertility indicators]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. 18 p. [in Ukrainian].
5. DSTU ISO 10381-6:2004. (2005). Yakist hruntu. Vidbir zrazkiv. Chastyna 6. Kerivnytstvo z vidboru zrazkiv dlia otsiniuvannya biolohichnoi aktyvnosti u hruntі [Soil quality. Sampling. Part 6. Guidance on the collection of samples to assess biological activity in soil]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. 9 p. [in Ukrainian].

6. Yevryuzhykhina H.Ya. Mites-Oribatids (Oribatei). Fauna of Ukraine. Vol. 27, Issue 1. Kyiv: Naukova Dumka, 1978. 360 p. [in Ukrainian].
7. Prytula N.M. (n.d.). Fito- ta zooindykatsiia stanu navkolyshnoho seredovyscha [Phyto- and zooinidication of the state of the environment]. *Instytutsiinyi repozytarii Zaporizkoho natsionalnoho universytetu*. URL: <https://dspace.znu.edu.ua/jspui/handle/12345/12902> (date of access: 18.06.2025). [in Ukrainian].
8. Smetana O.M., Smetana N.M. (2002). Zooindykatsiia antropohennoho navantazhennia na stepovi biotsenozy Kryvorizhzhia [Zooindication of anthropogenic load on steppe biocenoses of Kryvorizhzhia]. *Ekoloho-biolohichni doslidzhennia: materialy nauk. konf.*, Kryvyi Rih, 390–396. [in Ukrainian].
9. Barton P.S., Moir M.L. Invertebrate indicators and ecosystem restoration. In: Lindenmayer D., Barton P. (eds.) *Indicators and surrogates of biodiversity and environmental change*. Amsterdam : Elsevier, 2015, pp. 59–68.
10. Boháč J., Jahnová Z. Land use changes and landscape degradation in central and eastern Europe in the last decades: epigeic invertebrates as bioindicators of landscape changes. In: Kozłowski J. (ed.) *Environmental Indicators*. Dordrecht : Springer, 2015, pp. 395–420. DOI: 10.1007/978-94-017-9499-2_24.
11. Davidson M., Minor M., Todd J. Terrestrial macrofauna invertebrates as indicators of agricultural impacts. AgResearch Ltd., 2024. Available at: https://agresearch.figshare.com/articles/report/Terrestrial_macrofauna_invertebrates_as_indicators_of_agricultural_impacts/26001967?file=46945099
12. Fontanetti C.S., Nogarol L.R., Souza R.D., Perez D.G., Maziviero G.T. Bioindicators and biomarkers in the assessment of soil toxicity. In: Villalobos M. (Ed.), *Soil Contamination*. InTech, 2011, pp. 143–168. DOI: 10.5772/25042.
13. Gerlach J., Samways M., Pryke J. Terrestrial invertebrates as bioindicators: an overview of available taxonomic groups. *Journal of Insect Conservation*, 2013, vol. 17, pp. 831–850. DOI: 10.1007/s10841-013-9565-9.
14. Ghannem S., Bacha O., Fkiri S., Kanzari S., Aydi A., Touaylia S. Soil and sediment organisms as bioindicators of pollution. *Ecologies*, 2024, vol. 5, no. 4, pp. 679–696. DOI: 10.3390/ecologies5040040.
15. Manu M. Soil invertebrates – a useful tool in biomonitoring of heavy metal pollution: a review. *Studia Universitatis Vasile Goldis. Seria Stiintele Vietii (Life Sciences Series)*, 2017, 27(4), pp. 247–258.
16. Medhi J., Dutta J., Kalita M.C. Biomonitoring ecosystem: modelling relationship with environmental factors. In: Das S., Ray S. (Eds.), *Arthropods: Are they beneficial for mankind?* Singapore: Springer, 2021, pp. 113–130.
17. Paoletti M.G. *Invertebrate biodiversity as bioindicators of sustainable landscapes: Practical use of invertebrates to assess sustainable land use*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2012. 460 p.
18. Potapov M.A. *Synopses on Palaearctic Collembola: Volume 3. Isotomidae*. Warszawa: Museum and Institute of Zoology, Polish Academy of Sciences, 2001. 603 p.
19. Santorufo L., Van Gestel C.A., Rocco A., Maisto G. Soil invertebrates as bioindicators of urban soil quality. *Environmental Pollution*, 2012, vol. 161, pp. 57–63. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.09.042.
20. Weigmann G. *Hornmilben (Oribatida)*. In: Dahl F. (Ed.), *Die Tierwelt Deutschlands*, vol. 76. Jena: G. Fischer, 2006. 520 p.
21. Zaghoul A., Saber M., Gadow S., Awad F. Biological indicators for pollution detection in terrestrial and aquatic ecosystems. *Bulletin of the National Research Centre*, 2020, vol. 44, no. 1, pp. 1–11. DOI: 10.1186/S42269-020-00385-X.

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 24.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025

3. ГЕОГРАФІЯ

УДК 373.5.091.33:911.9:336.746(0)

DOI <https://doi.org/10.32782/naturalspu/2025.2.13>

ФОРМУВАННЯ БІОГЕОГРАФІЧНИХ ЗНАТЬ ЗАСОБАМИ НУМІЗМАТИЧНОЇ ГЕОГРАФІЇ: ОСВІТНІЙ І ВИХОВНИЙ ПОТЕНЦІАЛ МОНЕТ КРАЇН СВІТУ

Байтеряков Олег Зуфарович,

кандидат географічних наук, доцент,

доцент кафедри географії та туризму

Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7449-693X>

Мисько Володимир Зіновійович,

магістр, викладач географії,

керівник гуртків

Кам'янець-Подільського позашкільного навчально-виховного об'єднання

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6744-391X>

Мисько Тетяна Орестівна,

вчитель-методист,

вчитель географії Кам'янець-Подільського ліцею №17

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-7811-2049>

У статті розглядається нумізмати́чна географія як інноваційний напрям у географічній науці, що поєднує дослідження територіальної специфіки монетного виробництва з аналізом природних об'єктів, відображених на монетах. Обґрунтовується значення екологічної культури як ключового компонента сталого розвитку суспільства та підкреслюється потенціал монет із зображеннями флори й фауни для формування екологічної свідомості учнівської та студентської молоді. Мета статті передбачає виявлення освітнього та виховного потенціалу монет країн світу для формування біогеографічних знань, а також розробку підходів щодо використання нумізмати́чної географії в освітньому процесі. Особливу увагу приділено огляду монет країн Євразії, Північної та Південної Америки, Австралії, Океанії та Африки, на яких представлені види рослин і тварин, що є символами природного багатства регіонів та індикаторами екологічного стану довкілля. Автори на основі власних досліджень аналізують естетичний, пізнавальний та виховний аспекти використання нумізмати́чного матеріалу у навчальному процесі. Наголошується, що тематичні колекції монет можуть слугувати ефективним дидактичним засобом для інтеграції географічних, біологічних та екологічних знань, стимулювати інтерес до збереження біорізноманіття та виховувати відповідальне ставлення до природних ресурсів. Методика опрацювання окремих монет та їх тематичних серій може включати визначення умов їхнього утворення, а також складання нумізмати́чно-географічних карт. Представлені авторами таблиці та ілюстративні матеріали дозволяють організувати порівняльно-географічний аналіз, формувати екологічні уявлення на основі наочного сприйняття та розвивати критичне мислення учнів. Зазначено, що впровадження нумізмати́чної географії в освітню практику є доцільним, оскільки воно сприяє формуванню аналітичного мислення, загальнокультурної обізнаності, екологічної культури та екологічно орієнтованого світогляду здобувачів освіти.

Ключові слова: нумізмати́чна географія, монети країн Євразії, Північної та Південної Америки, Африки, Австралії та Океанії, екологічна культура, освітній процес.

Bayteryakov Oleh, Mysko Volodymyr, Mysko Tetiana. The formation of biogeographical knowledge by means of numismatic geography: educational and pedagogic potential of coins of the world

The article considers numismatic geography as an innovative direction in geographical science, which combines the study of the territorial specificity of coin production with the analysis of natural objects depicted on coins. The importance of ecological culture as a key component of sustainable development of society is substantiated and the potential of coins with images of flora and fauna for the formation of environmental awareness of schoolchildren and university students is emphasized. The purpose of the article is to identify the educational and pedagogic potential of the coins of the world for the formation of biogeographical knowledge, and to develop the approaches as for the application of numismatic geography in the educational process. Particular attention is paid to the review of coins of the countries of Eurasia, North and South America, Australia, Oceania and Africa, which present species of plants and animals that are symbols of the natural wealth of the regions and indicators of the ecological state of the environment. Based on their own research, the authors analyze the aesthetic, cognitive and educational aspects of the use of numismatic material in the educational process. It is emphasized that thematic coin collections can serve as an effective didactic tool for integrating geographical, biological and environmental knowledge, stimulating interest in preserving biodiversity and fostering a responsible attitude towards natural resources. The methodology for the study of some coins and their thematic series may include an identification of the presented

objects or representatives of the organic world, a comprehensive description of the depicted natural landscapes and an explanation of the conditions of their formation, as well as a compilation of numismatic and geographical maps. The tables and illustrative materials presented by the authors allow organizing a comparative geographical analysis, forming ecological ideas based on visual perception, and developing students' critical thinking. It is noted that the introduction of numismatic geography into educational practice is appropriate, since it contributes to the formation of analytical thinking, general cultural awareness, environmental culture, ecological culture and an environmentally oriented worldview of students.

Key words: numismatic geography, coins of Eurasia, North and South America, Africa, Australia and Oceania, ecological culture, educational process.

Вступ. У сучасних умовах глобальної екологічної кризи надзвичайно важливим завданням освіти є формування екологічної культури та відповідального ставлення до навколишнього середовища. Традиційні методи екологічного виховання часто не враховують міждисциплінарний підхід та потребу в нових формах мотивації учнів. Одним з ефективних способів підвищення пізнавальної активності учнів є застосування в освітньому процесі напрацювань нумізматичної географії, яка досліджує просторові особливості випуску грошових одиниць і виявляє та інтерпретує географічний зміст їхнього дизайну [1; 2]. Нумізматична географія, як поєднання еколого-природничого та історико-географічного аналізу монет країн світу, має значний освітній і виховний потенціал. Монети, що відображають природні ландшафти, флору і фауну, природоохоронні об'єкти, можуть стати ефективним засобом розвитку екологічної культури. Їх залучення в освітній процес сприяє не лише пізнавальному інтересу, а й формуванню емоційно-ціннісного ставлення до довкілля.

Нумізматична географія, як інноваційний напрям міждисциплінарних досліджень, володіє значним потенціалом у контексті формування цілісного уявлення про еколого-географічні процеси. Її застосування в освітньому середовищі сприяє поглибленню знань здобувачів освіти про просторову організацію природних і суспільних явищ, водночас активізуючи міждисциплінарні зв'язки. Аналіз змісту та візуального оформлення металевих грошових знаків дозволяє поєднувати географічні знання з історичними, культурними та екологічними контекстами, що розширює навчальний простір за межі традиційних методик викладання.

Залучення монет як дидактичного інструменту перетворює освітній процес на більш інтерактивний і дослідницький, мотивуючи учнів до самостійного аналізу символіки, зображень флори, фауни, природних ландшафтів та інших об'єктів, відтворених у дизайні валют. У такий спосіб формуються не лише предметні компетентності з географії, а й загальнокультурна обізнаність, екологічне мислення та відповідальне ставлення до довкілля.

Матеріали та методи дослідження. Застосування засобів нумізматичної географії потребує відповідної методики. Останнім часом цьому питанню було присвячено низку публікацій. Так, теоретичні питання боністичної географії і методику застосування банкнот світу в шкільному курсі географії висвітлено в монографії О.З. Байтерякова [1]. Основні напрямки досліджень боністично-нумізматичної географії розглядаються у публікації О.З. Байтерякова і В.З. Миська [2]. Підходи

до формування картографічної культури учнів засобами нумізматичної географії в шкільному курсі географії містяться у статті О.З. Байтерякова [3]. Питання відображення біорізноманіття України засобами нумізматичної географії подано у публікації О.З. Байтерякова і В.З. Миська [4].

В авторських дослідженнях представлено методичні підходи до використання грошових знаків у шкільному курсі географії для вивчення окремих материків або їх регіонів, зокрема Євразії, Африки, Південної і Північної Америки, Австралії та Океанії. Монети розглядаються як наочний та інформаційний ресурс, що сприяє міждисциплінарній інтеграції та формуванню просторового мислення учнів. Наприклад, в публікації В.З. Миська і Т.О. Мисько розглядається використання сучасних монет країн Європи [5]. Методика застосування монет країн Океанії у навчальній діяльності розбирається в матеріалах В.З. Миська, Т.О. Мисько і О.З. Байтерякова [6].

Застосування грошових знаків можливо і доречно для вивчення різних навчальних дисциплін. Так, А. Йонг висвітлює використання банкнот і монет для навчання фотографії та мистецтву [10]; І.М. Тимінська розглядає роль монет у дослідженні фольклору [8]; навіть є публікації з методики застосування грошових знаків для вивчення мови [9] тощо.

Метою статті є обґрунтування освітнього та виховного потенціалу монет країн світу як засобу формування біогеографічних знань і екологічної культури, а також розробка підходів щодо використання нумізматичної географії в освітньому процесі.

Результати дослідження. Спираючись на результати власних досліджень, присвячених залученню обігових монет у навчальну діяльність, автори пропонують у науковому обігу використовувати поняття «нумізматична географія». Цей термін пропонується як позначення окремого напрямку в географічній науці, що аналізує особливості карбування монет у різних державах світу та вивчає дизайн та географічні елементи, відображені в їхньому оформленні. Такий підхід відкриває нові можливості для педагогів, зокрема вчителів географії, біології, екології, а також керівників гуртків закладів позашкільної освіти. Монети можуть стати ефективним візуальним інструментом, який урізноманітнює освітній процес та сприяє глибшому засвоєнню матеріалу під час занять і гурткової роботи [1; 2].

Нумізматична географія здатна слугувати ефективним засобом формування екологічної свідомості та поширення природоохоронних ідей серед різних категорій населення. Грошові знаки, що містять

зображення об'єктів живої природи, символів охорони довкілля або унікальних природних ландшафтів, можуть виконувати роль візуальних засобів навчання, які вказують про необхідність збереження біорізноманіття та природних ресурсів. Через монети можливо ілюструвати представників флори й фауни, які перебувають під загрозою зникнення, тим самим стимулюючи інтерес до проблем захисту довкілля. Завдяки простоті сприйняття, монети можна успішно використовувати для екологічної просвіти в закладах загальної середньої освіти та серед широкого загалу [6]. Робота з монетами, зазвичай, може виступати одним з етапів у розвитку екологічної свідомості людини. Нумізматичні дослідження дають можливість краще зрозуміти ставлення різних країн та культур до відображення природи на власних монетах.

Розглянемо особливості зображення флори і фауни на монетах різних регіонів світу, що визначають їхній освітній потенціал.

Флора і фауна на монетах Євразії. За карбуванням монет, країни Європи умовно можна поділити на дві групи: країни Євразони та країни поза її межами. Серед країн Євразони флора і фауна найкраще представлена на монетах Німеччини, Австрії, Андорри та Кіпру (по 3 і більше монет). Зокрема, на монетах зображені типові рослини Альпійських гір: тирлич, едельвейс і примула альпійська (Австрія), гілка дуба із жолудями і стилізований орел (Німеччина), піренейська серна і гриф-ягнятник (Андорра), муфлони європейські (Кіпр), лебеді, які летять над тундрою і ягоди морошки (Фінляндія) та інші.

До введення євро, на усіх монетах Хорватії містились представники флори і фауни цієї балканської країни. На сьогоднішній день органічний світ країни представлений лише на одній монеті – номіналом 1 євро (кунія).

У низці держав, що не входять до складу Євразони, спостерігається зацікавленість у використанні образів представників тваринного та рослинного світу на національних монетах. Ісландія є яскравим прикладом такого підходу: на всіх її монетах, без винятку, зображено представників місцевої фауни, зокрема тріску, мойву, крабів, дельфінів та рибу пінагор, також відому як риба-горобець.

Під час опрацювання теми «Природні зони Євразії» у 7 класі, вчитель географії може ефективно використати візуальні матеріали, що містять зображення представників ісландської флори й фауни на монетах, доповнені їхніми реальними фотографіями, як засіб для активізації навчального процесу (рис. 1).

На усіх семи швейцарських монетах зображені різні стилізовані рослинні вінки-орнаменти (виноградна лоза, дубові гілки із жолудями, гілка альпійської троянди або рододендрону, гілка едельвейса).

Усі сучасні монети Великої Британії, які ввійшли в обіг у 2024 році, прикрашені зображеннями представників флори й фауни, що символізують природну спадщину королівства. Такий дизайн став можливим завдяки ініціативі короля Чарльза III, який відомий своєю багаторічною підтримкою збереження довкілля та біорізноманіття. Зокрема на них зображено: лісова або горіхова сонька (1 пенні), руда білка (2 пенні), дубовий лист як символ багатого біорізноманіття британських лісів і давніх монархічних традицій (5 пенсів), найбільший у світі глухар, що мешкає у Шотландії й зараз перебуває під критичною загрозою (10 пенсів), тупик атлантичний, майже 10 % світової популяції якого гніздяться на узбережжі Великої Британії; вид занесено до Червоного списку (20 пенсів), атлантичний лосось, який є пріоритетним видом для охорони через зниження популяції внаслідок забруднення річок, знищення середовища існування та надмірного рибальства (50 пенсів), бджоли, що символізують понад 250 видів бджіл у країні, які відіграють ключову роль у запиленні рослин (1 фунт), а також національні квіти: троянда Англії, нарцис Уельса, чортополох Шотландії, конюшина Північної Ірландії (монета номіналом 2 фунти).

Варто відзначити і приклад Угорщини, де майже половина (близько 44 %) усіх монет містить зображення представників місцевої флори та фауни. На реверсах (зворотний бік монети) сучасних грошових одиниць цієї країни можна побачити, зокрема, угорський крокус, ірис, велику білу чаплю, а також одного з рідкісних представників хижих птахів – сокола балабана.

Під час опрацювання теми «Природні зони Євразії» у шкільному курсі географії «Материків і океанів» (7 клас), доцільним є використання узагальнюючої таблиці, що подає відомості про зображення представ-



Рис. 1. Органічний світ на монетах Ісландії

ників флори та фауни на монетах окремих азійських країн як приклад взаємозв'язку природного середовища з культурними символами (табл. 1).

Флора і фауна на монетах Північної і Південної Америки. Серед країн Північної Америки чудовим засобом навчання можуть слугувати обігові монети США номіналом 25 центів (так звані квотери) тематичної серії «Прекрасна Америка», які представляють широкому загалу Національні парки та заповідні території (рис. 2).

На багатьох монетах цієї серії містяться зображення визначних природних об'єктів країни, а також представники флори і фауни. Зокрема, на квотерах є зображення, які репрезентують Національні парки США: Єллоустонський (штат Ваоймінг), Хот-Спрінгс (штат Арканзас), Деналі (штат Аляска), Гаваї-Волкейнос (штат Гаваї), Йосемітський (штат Каліфорнія),

Грейт-Бейсін (штат Невада), Гранд-Каньйон (штат Арізона), Акадія (штат Мен), Грейт-Бейсін (штат Невада), Глейшер (штат Монтана), Олімпік (штат Вашингтон) та інші (рис. 2).

Методика опрацювання монет серії «Прекрасна Америка» може включати визначення поданих об'єктів або представників органічного світу, комплексний опис зображених природних ландшафтів і пояснення умов їхнього утворення, а також складання нумізматично-географічних карт.

У країнах Південної Америки зображення представників флори та фауни найвиразніше представлені на монетах Аргентини, Гаяни, Колумбії, Перу, Уругваю та Фолклендських островів. У випадку Венесуели елементи органічного світу інтегровані в державну символіку: дві монети містять зображення національного герба, до основних складових якого належать сніп жита

Таблиця 1

Зображення рослин і тварин на монетах країн Азії

Країна	Номінал монети	Зображення рослин і тварин
Грузія	2 тетри	Павич
Туреччина	1 куруш	Проліски
Ємен	20 ріалів	Драконове дерево
ОАЕ	25 філсів	Газель
Бахрейн	5 філсів	Фінікова пальма
	10 філсів	Фінікова пальма
Індія	50 пайса	Квіти лотоса
	1 рупія	Квіти лотоса
	2 рупії	Квіти лотоса
	5 рупій	Квіти лотоса
Бангладеш	25 пайс	Голова тигра
Мальдівська республіка	1 ларі	Крона кокосової пальми
	5 ларі	Малі тунці (боніто)
	50 ларі	Головаста морська черепаха
	2 рупії	Мушля тихоокеанського моллюска Харонія тритон
Китай	1 цзяо	Квітка орхідеї
	5 цзяо	Квітка лотоса з листком
	1 юань	Квітка хризантеми
Південна Корея	50 вон	Стебло рису
	500 вон	Маньчжурський журавель у польоті
Японія	1 єна	Гілочка вишні з листям
	50 єн	Квітка хризантеми з листям
	100 єн	Квіти сакури (японської вишні) із листям
КНДР	1 чон	Квітка рододендрона Шліппенбаха
	5 чон	Квітка піона деревовидного
	10 чон	Квітка азалії
	50 чон	Квітка кімченерії (сорт-гібрид бегонії цибулинної)
	1 вона	Квітка кімірсенії (сорт-гібрид орхідеї)
Індонезія	50 рупій	Іволга на гілці
	100 рупій	Пальмовий какаду
	200 рупій	Балійський шпак
	500 рупій	Гілочка жасмину
Східний Тимор	1 сентаво	Мушля промислового моллюска Наутілуса
	5 сентаво	Рисові стебла
	10 сентаво	Півень
	50 сентаво	Гілка кавового дерева

Складено за колекціями монет та джерелом [7]



Рис. 2. Національні парки і заповідні території на квотерах США

та дикий кінь. Варто зазначити, що сучасні грошові знаки Парагваю не містять подібних мотивів, тоді як у монетах, випущених у період 1990–1993 років, такі зображення були присутні.

Рослинний світ Аргентини відображено на монетах у надзвичайно оригінальний спосіб. На аверсах (лицьова сторона монети) і реверсах (зворотний бік монети) усіх номіналів зображено дерева та їхні квітки, серед яких – жакаранда, сейба розкішна, арраян та просопис кальденія. З точки зору навчального процесу, пізнавальним є той факт, що дерево просопис кальденія є ендемічним для субтропічних територій Аргентини та внесене до Червоного списку видів, що перебувають під загрозою зникнення, відповідно до класифікації Міжнародного союзу охорони природи (МСОП).

Монети Колумбії демонструють виняткове різноманіття органічного світу. Серед зображених об'єктів на грошових знаках: андійський (очковий) ведмідь, рослина фрайлехон, червоний ара, скляна жаба та головаста морська черепаха. Особливістю країни є подання видів двома мовами – іспанською та латинською. Наприклад, на монеті номіналом 200 песо зображено червоного ара із підписами Guacamaya Bandera (іспанською) та Ara macao (латинською). Аналогічну увагу до представників дикої природи виявляє й нумізматики Уругваю: на чотирьох монетах цієї країни зображено ендемічних тварин Уругваю та Південної Америки – броненосця (1 песо), капібару (2 песо), страуса нанду (5 песо) та пуму (10 песо).

Органічний світ Фолклендських островів представлений у нумізматиці надзвичайно широко й різноманітно. Усі сім сучасних монет цієї території містять зображення характерних представників місцевої фауни

субантарктичної зони, зокрема: пінгвінів-шкіперів, магелланських каргарок, чорнобрових альбатросів, морських левів, овець породи Ромні-Марш, а також вимерлого ще у XIX столітті фолклендського вовка (представлений на монеті номіналом 50 пенсів). Окрім того, навіть на монеті номіналом 1 фунт зображено вівцю – важливий зоологічний символ, що входить до складу офіційного герба Фолклендських островів.

Флора і фауна на монетах Африки. Африканський континент вирізняється характерною, часто унікальною біотою, що знайшло своє вираження в нумізматиці традиціях багатьох африканських держав – через зображення представників флори та фауни на національних монетах (рис. 3).

Національні валюти африканських країн часто демонструють рідкісних і знакових представників фауни, що символізують природне багатство континенту. До таких зображень належать, зокрема, африканський слон, гепард, жирафа, лев, горила та носоріг – тварини, що репрезентують екосистеми саван, тропічних лісів і посушливих регіонів. Значна частина цих видів включена до переліку Міжнародної Червоної книги, а їхнє збереження перебуває під контролем як глобальних природоохоронних структур, зокрема Міжнародного союзу охорони природи (МСОП), так і низки національних агентств, серед яких Kenya Wildlife Service (KWS), South African National Parks (SANParks), Uganda Wildlife Authority (UWA), Zimbabwe Parks and Wildlife Management Authority (ZimParks), Tanzania National Parks Authority (TANAPA), Administração Nacional das Áreas de Conservação (ANAC) та інші (рис. 3).

Окрім зображень тварин, на монетах багатьох африканських держав представлені унікальні види флори,



Рис. 4. Тваринний світ на монетах Австралії та Океанії

акцентування уваги на проблемах збереження біорізноманіття, охорони довкілля та сприяння сталому розвитку. Зокрема, національні валюти африканських країн нерідко містять зображення тварин, що перебувають під загрозою зникнення, акцентуючи таким чином на необхідності їх охорони та вивчення в контексті біогеографії. Ці види виступають уособленням дикої природи африканського континенту, а їхнє візуальне представлення на монетах сприяє підвищенню обізнаності щодо проблем браконьєрства, деградації природних середовищ існування та необхідності їх збереження.

Австралія та країни Океанії також активно використовують нумізматику для популяризації своєї унікальної фауни, зображуючи на монетах кенгуру, коалу, гаттерію, птаха кагу, качкодзьоба та єхидну, що підкреслює важливість збереження місцевої екосистеми.

Використання нумізматичної географії в освітньому процесі має значний розвивальний потенціал, що дозволяє поєднати навчальний процес із практичним дослідженням монет. Завдяки цьому учні можуть не лише ознайомитися з грошовими одиницями різних країн, але й проаналізувати їхній зміст, що сприяє розвитку аналітичного та логічного мислення.

Нумізматична географія відіграє важливу роль у формуванні екологічної культури, адже монети зображають унікальні види флори й фауни різних регіонів. Такі зображення знайомлять учнів із біорізноманіттям планети та привертають увагу до видів, що потребують охорони. Аналізуючи монети, школярі усвідомлюють актуальні екологічні проблеми та необхідність збереження природних ресурсів. Отже, нумізматику стає не лише джерелом природничих та історичних знань, а й ефективним засобом екологічного виховання.

Література:

1. Байтеряков О.З. Боністична географія. Методика застосування банкнот у шкільному курсі «Географія. Материки та океани»: монографія. Тернопіль: Осадца Ю.В., 2024. 156 с.
2. Байтеряков О., Мисько В. Основні напрямки досліджень боністично-нумізматичної географії. *Міждисциплінарні інтеграційні процеси у системі географічної, туристологічної та екологічної науки*: матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Тернопіль, 15-16 травня 2025 р.). Тернопіль: ФОП Осадца Ю.В., 2025. С. 258-260.

3. Байтеряков О.З. Формування картографічної культури засобами нумізматичної географії у шкільному курсі «Україна у світі: природа, населення». *Природнича освіта та наука*, (4), 2024. С. 7-14. DOI: <http://dx.doi.org/10.32782/nser/2024-4.01>
4. Байтеряков О.З., Мисько В.З. Відображення біорізноманіття України засобами нумізматичної географії. *Актуальні проблеми охорони біорізноманіття та наукових досліджень в умовах воєнного та післявоєнного часу: Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції* (Запоріжжя, 26–27 вересня 2024 р.). Запоріжжя: Видавництво МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2024. С. 110-112.
5. Мисько В.З. Обігові монети країн Європи : історія, опис, систематизація, методика застосування на уроках географії. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії : Збірник наукових праць*. Вип. 33. Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2021. С. 30-40. DOI: <https://doi.org/10.26565/2075-1893-2021-33-04> (дата звернення: 12.07.2025)
6. Мисько В.З., Мисько Т.О., Байтеряков О.З. Нумізматична географія: сучасні монети країн Океанії, опис та застосування в освітньому процесі. *Money & Banking: гроші та банки в історії Європи: тези доповідей I нумізматичної щорічної конференції* (м. Київ, 16-18 вересня 2024 року). Київ, 2024. С. 238-241
7. Монети світу. URL: <https://uk.ucoin.net/> (дата звернення: 15.07.2025)
8. Тимінська І.М. Легенди на монетах Великої Британії XVII–XX ст.: переклад, семантика, класифікація. *Science and Education a New Dimension. Philology*, III(10), Issue: 47, 2015. С. 111-114.
9. Learning German through German Money Presses Traditions. <http://surl.li/omiqaz> (дата звернення: 10.08.2024)
10. Young A. Teaching art with currency. 2023. URL: <https://www.bankofcanadamuseum.ca/2023/02/teaching-art-with-currency/> (дата звернення: 11.06.2025)

References:

1. Baiteriakov, O.Z. (2024). Bonistychna heohrafiia. Metodyka zastosuvannia banknot u shkilmomu kursі «Heohrafiia. Materyky ta okeany»: monohrafiia [Banknote geography. Methodology of using banknotes in the school course «Geography. Continents and oceans»: monograph]. Ternopil: Osadtsa Yu. 156 p. [in Ukrainian].
2. Baiteriakov, O., & Mysko, O. (2025). Osnovni napriamky doslidzhen bonistychno-numizmatychnoi heohrafiі [Main directions of research in bonistic and numismatic geography]. Interdisciplinary integration processes in the system of geographical, tourismological and environmental science: materials of the IV International Scientific and Practical Conference. Ternopil: FOP Osadtsa Yu.V. P. 258-260. [in Ukrainian].
3. Baiteriakov, O.Z. (2024). Formuvannia kartohrafichnoi kultury zasobamy numizmatychnoi heohrafiі u shkilmomu kursі «Ukraina u sviti: pryroda, naselennia» [Formation of cartographic culture by means of numismatic geography in the school course «Ukraine in the world: nature, population»]. *Natural Education and Science*, (4). P. 7-14. <http://dx.doi.org/10.32782/nser/2024-4.01> [in Ukrainian].
4. Baiteriakov, O.Z., & Mysko, V.Z. (2024). Vidobrazhennia bioriznomanittia Ukrainy zasobamy numizmatychnoi heohrafiі [Representation of Ukraine's biodiversity by means of numismatic geography]. Current problems of biodiversity protection and scientific research in wartime and post-war times: Materials of the II All-Ukrainian Scientific and Practical Conference. Zaporizhzhia: Publishing House of the Bogdan Khmelnytskyi Melitopol State University. P. 110-112. [in Ukrainian].
5. Mysko, V.Z. (2021). Obihovi monety krain Yevropy : istoriia, opys, systematyzatsiia, metodyka zastosuvannia na urokakh heohrafiі [Circulating coins of European countries: history, description, systematization, methods of application in geography lessons]. Problems of continuing geographical education and cartography: Collection of scientific papers. Issue 33. Kharkiv.: V. N. Karazin KhNU. P. 30-40. <https://doi.org/10.26565/2075-1893-2021-33-04> [in Ukrainian].
6. Mysko V.Z., Mysko T.O., & Baiteriakov O.Z. (2024). Numizmatychna heohrafiia: suchasni monety krain Okeanii, opys ta zastosuvannia v osvithnomu protsesi [Numismatic geography: modern coins of Oceania, description and application in the educational process]. *Money & Banking: money and banks in the history of Europe: abstracts of the reports of the 1st annual numismatic conference*. Kyiv. Kyiv. P. 238-241. [in Ukrainian].
7. Monety_svitu [Coins of the World]. URL: <https://uk.ucoin.net/>
8. Tyminska, I.M. (2015). Lehendy na monetakh Velykoi Brytanii XVII–XX st.: perekład, semantyka, klasyfikatsiia [Legends on the coins of Great Britain of the XVII–XX centuries: translation, semantics, classification]. *Science and Education a New Dimension. Philology*, III(10), Issue: 47. P. 111-114. [in Ukrainian].
9. Learning German through German Money Presses Traditions. Retrieved from: <http://surl.li/omiqaz>
10. Young, A. (2023). Teaching art with currency. Retrieved from: <https://www.bankofcanadamuseum.ca/2023/02/teaching-art-with-currency/>

Дата першого надходження рукопису до видання: 18.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 22.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025

ТРАНСПОРТНА ДОСТУПНІСТЬ АДМІНІСТРАТИВНИХ ЦЕНТРІВ СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ: ПРОСТОРОВО-ГЕОГРАФІЧНИЙ ПІДХІД

Корнус Анатолій Олександрович,

кандидат географічних наук, доцент,
доцент кафедри загальної та регіональної географії
Сумського державного педагогічного університету імені А.С. Макаренка
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5924-7812>
Scopus Author ID: 57198508125
Web of Science Researcher ID: O-6053-2015

Корнус Олеся Григорівна,

кандидат географічних наук, доцент,
завідувач кафедри загальної та регіональної географії
Сумського державного педагогічного університету імені А. С. Макаренка
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7469-7291>
Scopus Author ID: 57198491514
Web of Science Researcher ID: AAB-6700-2021

Данильченко Олена Сергіївна,

кандидат географічних наук, доцент,
доцент кафедри загальної та регіональної географії
Сумського державного педагогічного університету імені А. С. Макаренка
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2881-843X>
Scopus Author ID: 58090023000
Web of Science Researcher ID: ABS-0308-2022

Король Олена Миколаївна,

кандидат педагогічних наук,
доцент, доцент кафедри загальної та регіональної географії
Сумського державного педагогічного університету імені А. С. Макаренка
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0175-3824>
Scopus Author ID: 57218827420
Web of Science Researcher ID: GQP-2959-2022

Луценко Сергій Вікторович,

доктор філософії,
старший викладач кафедри загальної та регіональної географії
Сумського державного педагогічного університету імені А. С. Макаренка
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9250-6700>
Scopus Author ID: 57222478619
Web of Science Researcher ID: ABR-9502-2022

Стаття присвячена оцінці транспортної доступності районних центрів Сумської області з використанням методів теорії графів. Транспортна мережа була представлена у вигляді зваженого неорієнтованого графа, відстані між центрами вимірювалися по найкоротших автомобільних маршрутах. Як об'єкт дослідження вибрано п'ять опорних пунктів – районних центрів регіону: Суми, Ромни, Конотоп, Охтирка та Шостка. В аналізі було застосовано набір топологічних показників, включаючи суму довжин найкоротших шляхів (абсолютний індекс доступності), ексцентричність (максимальна найкоротша відстань), а також відносні індекси Бавелаша і Бошампа, що нормують абсолютні значення і дозволяють порівнювати вузли в межах однієї мережі та виявляти «центральної» й «периферійні» позиції. Додатково узагальнено середні значення індексів для мережі в цілому, що дає змогу охарактеризувати її інтегрованість. Розрахунки здійснено із застосуванням програмного середовища Python та бібліотек для аналізу графів і масивів даних NetworkX та NumPy, що забезпечує відтворюваність процедур.

Результати демонструють чітку диференціацію рівня доступності серед п'яти проаналізованих центрів. Суми та Ромни займають найсприятливіші позиції, що характеризуються меншою сумою найкоротших відстаней та меншими значеннями ексцентричності, що вказує на їх відносну центральність у регіональній мережі. Конотоп займає проміжну позицію, тоді як Охтирка та Шостка демонструють вищі значення ексцентричності та нижчі значення центральності, що відображає їх

більш периферійну роль. На рівні мережі індекси показують помірну зв'язність, причому доступність залежить від просторової конфігурації та відстаней між населеними пунктами.

Дослідження підкреслює потенціал графо-теоретичних підходів для аналізу регіональних транспортних структур. Отримані результати можуть слугувати основою для вдосконалення транспортної політики, оптимізації міжрайонних сполучень та визначення пріоритетів інвестицій в інфраструктуру Сумської області.

Ключові слова: транспортна доступність, теорія графів, індекс Бавелаша, індекс Бошама, ексцентриситет, Сумська область, регіональна транспортна мережа.

Kornus Anatolii, Kornus Olesia, Danylchenko Olena, Korol Olena, Lutsenko Serhii. Transport Accessibility of Administrative Centres in Sumy Oblast: A Spatial-Geographical Approach

The article focuses on the assessment of transport accessibility of district centres in Sumy region using graph theory methods. The transport network was represented as a weighted undirected graph, with distances between centres measured along the shortest road routes. Five key locations were selected as the subject of the study – regional centers in the region: Sumy, Romny, Konotop, Okhlyrka, and Shostka. The analysis applied a set of topological metrics, including the sum of shortest path lengths (absolute accessibility index), eccentricity (maximum shortest distance), as well as relative indices of Bavelas and Beauchamp, which normalize absolute values and allow comparing nodes within a single network and identifying “central” and peripheral positions. Additionally, the average values of the indices for the network as a whole are generalized, which makes it possible to characterize its integration. The calculations were performed using the Python software environment and libraries for graph and data array analysis NetworkX and NumPy, which ensures the reproducibility of the procedures.

The results demonstrate a clear differentiation in the level of accessibility among the five analysed centres. Sumy and Romny show the most favourable positions, characterised by lower sums of shortest path lengths and smaller eccentricity values, which indicates their relative centrality in the regional network. Konotop occupies an intermediate position, while Okhlyrka and Shostka display higher eccentricity and lower centrality values, reflecting their more peripheral roles. At the network level, the indices reveal moderate connectivity, with accessibility influenced by spatial configuration and inter-settlement distances.

The study highlights the potential of graph-theoretical approaches for analysing regional transport structures. The findings may serve as a basis for improving transport policy, optimising inter-district connections, and prioritising infrastructure investments in Sumy region.

Key words: transport accessibility, graph theory, Bavelas index, Beauchamp index, eccentricity, Sumy region, regional transport network.

Вступ. Сумська область, розташована на північному сході України, має складну транспортну структуру, що сформувалася під впливом як природних факторів (річкова мережа, лісостеповий ландшафт), так і історичного розвитку населених пунктів. В умовах адміністративно-територіальної реформи, яка передбачає укрупнення громад і зміну підходів до просторового планування, оцінка транспортної доступності стає важливим інструментом для прийняття управлінських рішень.

Актуальність дослідження транспортної доступності Сумської області також зумовлена необхідністю оцінки просторової справедливості в розподілі ресурсів та послуг. Нерівномірна доступність може спричинити економічну стагнацію окремих територій, зниження мобільності населення та соціальну ізоляцію малих населених пунктів. Аналіз транспортної мережі за допомогою методів теорії графів дозволяє об'єктивно оцінити ситуацію, виявити слабкі місця в інфраструктурі та сформулювати пропозиції щодо її оптимізації.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. У вітчизняному науковому дискурсі поняття «транспортної доступності» має кілька трактувань. Так, С. Пугач і С. Новосад розглядають його як індикатор просторових можливостей суспільства, вказуючи, що більш адекватним може бути термін «транспортна дискримінація» [1]. У роботах А. Мазурової та П. Вірченко транспортна дискримінація визначається як просторове обмеження транспортних послуг, що знижує мобільність населення та конкурентоспроможність територій [2]. Проте в нашому дослідженні використано термін «транспортна доступність», оскільки увагу зосере-

джено на кількісній оцінці структури транспортної мережі засобами графового аналізу, тоді як поняття «транспортна дискримінація» апелює передусім до соціально-економічних аспектів.

Проблематиці транспортної доступності присвячено низку робіт українських вчених. На локальному рівні цей підхід застосовано у дослідженнях С. Анісімової та ін., які оцінили доступність рекреаційних територій уздовж річки Сіверський Донець [3]. Схожі підходи використав О. Байтеряков із В. Вороною, побудувавши графи автомобільної мережі Запорізької області [4], а Ю. Барський та ін. дослідили часову доступність районів міста Луцька [5]. О. Дзюбинська та ін. показали вплив транспортної інфраструктури на рекреаційний розвиток Волині [6], тоді як О. Загурський акцентував на інституційних аспектах транспортної доступності, зокрема у сільських територіях [7].

Окремий напрям становлять прикладні дослідження. О. Лейберюк застосувала геопросторовий аналіз для визначення зон доступності медичних послуг у рамках медичної реформи [8]. О. Матійчик обґрунтував багатовимірний підхід до поняття транспортної доступності та розробив методіку оцінки ефективності транспортної мережі [9]. Просторові особливості транспортної доступності на рівні регіонів аналізували Ю. Сільченко та ін. [10], А. Корнус [11].

У низці досліджень застосовано геоінформаційні технології. Так, М. Томашук розглядає застосування ГІС для оцінки транспортної доступності в контексті формування об'єднаних територіальних громад в Україні [12]; В. Третяк і В. Лепетюк побудували ізо-

хрони туристичних маршрутів на основі OpenStreetMap [13]; П. Уль та ін. пропонують методику моделювання транспортної доступності території за допомогою побудови ізохрон із використанням відкритих даних OpenStreetMap, ГІС GRASS GIS та СКБД PostgreSQL [14]. П. Яновський і О. Матійчик узагальнили підходи до оцінки транспортної доступності, запропонували концепцію інтегрального показника для регіонального рівня [15].

Незважаючи на певну кількість робіт, присвячених транспортній доступності в Україні, Сумська область залишається малодослідженою, що й зумовило вибір теми даної роботи.

Матеріал та методи. Аналіз транспортної мережі проводився з використанням методів теорії графів, яка визначає топологічну транспортну доступність. Відповідно, транспортна мережа була змодельована у вигляді неорієнтованого зваженого графа, де вузли представляли районні центри, а ребра відповідали зв'язкам між ними. Під час оцінки транспортної доступності враховувалось не лише кількість і співвідношення ребр графу, але і їх вага (відстань між вершинами). При цьому, відстань між населеними пунктами (вершинами графу) вимірювалась в умовних кілометрах (ум. км), що враховують умови пересування, такі як швидкість, час і комфортність руху. Ці умови залежать від категорії автомобільного шляху – кількості смуг для руху, їх ширини та облаштування. Це, як свідчать результати аналізу [4], дає більш точний результат. Для визначення відстані в ум. км застосовувались відповідні коефіцієнти на які помножувалась реальна відстань. Так, для доріг національного значення застосовувався коефіцієнт 1,0, для регіональних доріг – 1,1, для територіальних доріг – 1,2, для обласних доріг – 1,4, для районних – 1,5. Названі коефіцієнти, з невеликими змінами, були запозичені нами з роботи [4].

Для визначення найкоротших шляхів між усіма парами міст було сформовано матрицю найкоротших відстаней, після чого обчислено абсолютні індекси доступності, а також значення індексів Бавелаша та Бошама для кожного міста. Для характеристики загальної доступності мережі було додатково визначено середнє значення кожного з індексів.

Індекс Бавелаша розраховано як відношення суми всіх абсолютних індексів доступності до абсолютного індексу доступності конкретної вершини графу. У роботі [4] для розрахунку індексу Бавелаша B_i застосовано формулу:

$$B_i = \frac{\sum_{j=1}^n S_j}{S_i} \quad (1),$$

де: S_i – абсолютний індекс доступності для вершини i , n – кількість вершин у графі.

Ця формула більше підходить для оцінки реальних транспортних мереж, оскільки враховує загальну конфігурацію мережі, що дає змогу краще аналізувати її топологічну структуру. Вона враховує «відносність» доступності кожної вершини до решти мережі й акцентує увагу на порівнянні конкретного вузла мережею в цілому.

Якщо індекс Бавелаша оцінює вузол з точки зору його абсолютної доступності у порівнянні з іншими вузлами, то індекс Бошама, відомий також як індекс Бічема, оцінює відносну доступність (наскільки ефективно вузол пов'язаний із рештою мережі), враховуючи загальну кількість вузлів у мережі. Це дозволяє використовувати його для порівняння між різними графами. Чим менше значення S_i (сума відстаней) (суми відстаней між вузлами), тим більше значення індексу R_i , що вказує на більш центральне положення вузла. Індекс Бошама розраховується за формулою [4]:

$$R_i = \frac{n - 1}{S_i} \quad (2),$$

де R_i – індекс Бошама для вершини i , n – кількість вершин у графі, S_i – абсолютний індекс доступності вершини i , що дорівнює сумі найкоротших відстаней від вершини i до всіх інших вершин графу.

Вузол з вищим індексом Бошама вважається більш центральним, тому що він має вищу ефективність відносно всієї мережі (вузол має відносно меншу суму відстаней до інших вузлів, тобто він розташований «вигідно» в топології мережі). Вузол з нижчим індексом Бошама розташований на периферії або має меншу транспортну доступність до інших вузлів (вузол має велику суму відстаней до інших, що робить його менш «центральним»).

Розрахунки індексів транспортної доступності та інших показників виконано у середовищі Python із використанням бібліотек Networkx і NumPy.

Викладення основного матеріалу. Для загального топологічного аналізу автомобільної транспортної доступності районних центрів Сумської області побудовано граф їхнього транспортно-географічного положення, що відображає взаємне розташування адміністративних центрів та їхнє сусідство. З липня 2020 р. на території регіону створено 5 адміністративних районів, замість 18, що існували раніше. Відтак центри цих районів утворили вершини відповідного графу. Як уже зазначалося в розділі «Матеріал і методи», під час оцінки транспортної доступності враховувалось не лише кількість і співвідношення ребр графу, але і їх вага, у якості якої взято відстань між вершинами.

Спочатку було розраховано індекс абсолютної доступності вершини графу, у даному випадку центру адміністративного району, що характеризує суму ребер графа (шляхів) до всіх інших районних центрів області. За цим індексом найкраще положення мають центри з найменшим показником. Як свідчать розрахунки, за кількістю ребр найменший абсолютний індекс – 4 має обласний центр – Суми, індекс – 7 встановлено у Шостки, значення абсолютного індексу доступності інших районних центрів області, зокрема Ромен і Конотопа дорівнює 5, а Охтирки – 6.

Однак, результати розрахунку цього показника за відстанню, що враховує умови пересування, відрізняються. Найкраще, тобто центральне, положення зберігається за Сумами з сумою відстаней 510,1 ум. км, далі з показниками від 524,8 і 593,3 ум. км розташувалися Ромни і Конотоп, а найгірше положення має не Шостка

(753,8 ум. км), а Охтирка (812 ум. км). Іншими словами, можемо побачити певну різницю у результатах між розрахунками за кількістю ребер графа і за відстанню (табл. 1).

Для оцінки транспортної доступності також розраховано число Кеніга і показник максимальної транспортної віддаленості (ексцентричності районного центру – вершини графу). Число Кеніга (або радіус графа) – це найменша з ексцентричностей усіх вершин графа, іншими словами, це найменша кількість вершин, через які проходять всі ребра графа. Центральними вважаються центри з найменшими показниками. За кількістю ребер число Кеніга для Сум складає 1 і для всіх інших райцентрів області однакове і дорівнює 2.

Ексцентричність для кожного районного центру – це найдовший шлях від нього до іншого центру. Найменші значення вказують на центральні вузли, тобто ті, які розташовані найближче до всіх інших. У розрахунку цього показника за відстанню можна побачити певну диференціацію, Ромни мають найменше число Кеніга (175,2 км) – це означає, що з усіх районних центрів вони найближчі до найвіддаленішого від них центру (тобто, вони мають найкращу транспортну доступність у межах мережі). Суми (199,1 км) також мають відносно невелике число Кеніга, що очікувано, зважаючи на їх роль, як адміністративного центру області. Конотоп, Охтирка та Шостка мають значно вищі значення (275-282 км), що свідчить про їхню більшу транспортну віддаленість у регіональному масштабі.

Аби оцінити компактність нашого графа районних центрів розраховано середню відстань від даного вузла до всіх інших. За результатами розрахунків, середня відстань між усіма парами районних центрів у графі становить 159,7 км. Для кожного окремого вузла показники наступні: Суми – 127,53 км, Ромни – 131,20 км, Охтирка – 203,00 км, Конотоп – 148,33 км і Шостка – 188,45 км (табл. 1)

Показником транспортної доступності, що враховує ієрархічний ступінь населених пунктів, є їхня доступність до адміністративного центру території, у нашому випадку – до обласного центру. Така доступність забезпечує населення можливістю отримання додаткових медичних, освітніх, соціальних, побутових та інших послуг. Для райцентрів Сумської області доступність обласного центру коливається від 78,9 до 199,1 ум. км.

Розмах цього показника більше ніж у 2,5 рази пояснюється значною площею області і розташуванням обласного центру і райцентрів ближче до її периферії. Найкраща доступність обласного центру спостерігається у Охтирки (78,9 ум. км), проміжні значення даного показника мають Ромни (103 ум. км) та Конотоп (129,1 ум. км), найвіддаленішою виявляється м. Шостка (199,1 ум. км). Як бачимо, за більшістю абсолютних показників автомобільної транспортної доступності Сумської області лідирують Суми і Ромни. Гірше положення має Конотоп і найгірше – Шостка та Охтирка.

Як видно з формули (1), індекс Бавелаша розраховується як відношення суми всіх абсолютних індексів доступності до абсолютного індексу доступності конкретного районного центру. У найпростішій формі цей індекс оцінює, наскільки короткі найкоротші шляхи між одним райцентром і усіма іншими в транспортній мережі. Найбільше значення цього показника свідчить про краще транспортно-географічне положення пункту. Отримані значення індексу (табл. 1) показують, наскільки кожен райцентр «близький» до всіх інших. Чим вищий індекс Бавелаша, тим більш «центральною» є вершина у графі з точки зору доступності. Середнє значення цього індексу для розглянутого графа становить 5.16, що свідчить про загалом середню доступність вершин у межах цієї мережі. Найвищі значення цього показника мають Суми (5.97) та Конотоп (5.87), що вказує на їхнє центральне розташування в структурі графа та відносно низькі сумарні відстані до інших міст. Найнижчий індекс Бавелаша спостерігається у Шостки (4.04) та Охтирки (4.13), що свідчить про їхню віддаленість від інших районних центрів.

Відносний індекс Бошама являє собою відношення загальної кількості пунктів транспортної мережі до абсолютного індексу доступності певного пункту, оцінюючи відносну «центральність» вузла в контексті всієї мережі. Він, на відміну від індексу Бавелаша, дозволяє зіставити протяжність транспортних шляхів від даного пункту не з протяжністю, а з насиченістю транспортної мережі. Разом з тим, на відміну від числа Кеніга, яке показує найвіддаленішу відстань від одного вузла до іншого, індекс Бошама враховує всю мережу загалом. Краще транспортне положення пункту визначається за більшим показником цього індексу.

Таблиця 1

Показники транспортної доступності районних центрів Сумської області

Районні центри	Індекс абсолютної транспортної доступності (ум. км)	Ексцентричність (ум. км)	Середня відстань вузла (ум. км)	Центральність вузла (індекс Бавелаша)	Індекс Бошама
Конотоп	593,3	282,0	148,33	5.87	0.0067
Охтирка	812	282,0	203,00	4.13	0.0049
Ромни	524,8	175,2	131,20	5.80	0.0076
Суми	510,1	199,1	127,53	5.97	0.0078
Шостка	753,8	275,9	188,45	4.04	0.0053

Середнє значення індексу Бошама, що характеризує ефективність досягнення інших вершин з кожного міста, для нашого графа становить 0.0068. Найвищі значення індексу мають Суми (0.0078) та Конотоп (0.0077), що ще раз підтверджує їхню відносно високу транспортну доступність. Найнижчі значення цього показника спостерігаються у Шостки (0.0053) та Охтирки (0.0054), що свідчить про їхню периферійність у структурі транспортної мережі.

Висновки. Отримані результати свідчать про помірну транспортну доступність районних центрів Сумської області. Значення визначених у роботі розрахункових показників не є надто високими, що вказує на можливі труднощі в логістиці між містами, але й не критично низькі, що підтверджується достатнім рівнем зв'язності. Якщо порівнювати їх з транспортною мережею мегаполісів чи розвинених європейських регіонів, то ці значення низькі. Однак, якщо взяти до уваги, що Сумська область – це периферійний регіон із середньою густотою доріг, такі значення можна вважати достатньо типовими.

Індекси Бавелаша та Бошама дозволили оцінити рівень зв'язності та ефективність транспортної доступності між п'ятьма районними центрами Сумської області. Середнє значення індексу Бавелаша для розглянутої мережі становить 5,16, що вказує на помірний рівень доступності вершин у межах графа. Оскільки цей показник характеризує взаємну досяжність міст, його значення можна порівняти з аналогічними дослідженнями транспортних мереж інших регіонів. У розвинених дорожніх системах, таких як центральні регіони європейських країн, значення індексу Бавелаша зазвичай знаходяться в межах 8-12 [16], а інколи й перевищують їх, що свідчить про значно кращу транспортну інтеграцію. Для периферійних районів, зокрема сільських територій України, цей показник є значно ниж-

чим і часто коливається в межах 4-6. Отже, отримане нами значення вказує, що аналізована мережа має середню доступність – вона не є надто щільною, проте й не демонструє критичних проблем із досягненням кожного районного центру.

Середнє значення індексу Бошама, що характеризує ефективність досягнення інших вершин графа з кожного міста, становить 0.0068. Високі значення цього індексу зазвичай характерні для густих транспортних мереж, наприклад, у міських агломераціях та регіонах з високою щільністю доріг, вони можуть досягати 0.01-0.02 і більше. У більшості периферійних та сільських регіонів цей показник, як правило, нижчий, оскільки міжміські зв'язки часто здійснюються через обмежену кількість маршрутів. Значення 0.0068 для транспортної мережі районних центрів Сумської області свідчить про її помірний рівень зв'язності, який є типовим для регіональних мереж, що не мають великої кількості альтернативних транспортних шляхів.

Загальний аналіз обох індексів демонструє, що транспортна мережа досліджуваного регіону забезпечує достатній рівень доступності між районними центрами, однак вона не є оптимальною з точки зору мінімізації транспортних витрат. Високі значення індексів у містах Суми, Ромни та Конотоп свідчать про їхню центральну роль у регіональній транспортній системі, тоді як Шостка та Охтирка мають нижчі значення, що підтверджує їхню периферійність. Це може вказувати на необхідність удосконалення транспортної інфраструктури для підвищення рівня зв'язності та покращення логістичних можливостей у регіоні. Одним із потенційних напрямів удосконалення може бути розвиток альтернативних маршрутів між містами, які мають найнижчі показники індексів, що сприятиме більш рівномірному розподілу транспортних потоків і зменшенню залежності від основних доріг.

Література:

1. Пугач С. О., Новосад С. В. Трактуння понять «транспортна доступність» та «стиснення простору» у сучасній науковій літературі // Актуальні проблеми країнознавчої науки : матеріали III Міжнарод. наук. практич. інтернет-конференції (м. Луцьк, 15–16 грудня 2015 р.). Луцьк: Вежа, 2015. С. 28–31.
2. Мазурова А. В., Вірченко П. А. Суспільно-географічні чинники, які спричиняють транспортну дискримінацію населення України (на прикладі залізничного транспорту) // Регіон – 2012 : Стратегія оптимального розвитку : Матеріали наук.-практич.-конф. з міжнародною участю. – Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2012. – С. 144–147.
3. Анісімова С. В., Васенко О. Г., Анісімов С. В. Оцінка транспортної доступності заміських зон відпочинку як фактора, що впливає на рекреаційну цінність території. *Автомобільний транспорт*. 2017. Вип. 41. С. 196–203. DOI: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2017.41.0.196>
4. Байтерьяков О. З., Воронова В. В. Топологічний аналіз автомобільної транспортної мережі Запорізької області. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2024. Вип. 60. С. 137–158. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-10>
5. Барський Ю. М., Пугач С. О., Яковлев Т. В. Просторовий аналіз транспортної доступності територій у межах міста Луцька. *Економічні науки. Серія : Регіональна економіка*. 2016. Вип. 13. С. 35–45.
6. Дзюбинська О. В., Дзюбинський А. В., Сміль М. В. Оцінка транспортної доступності рекреаційних територій Волинської області. *Економічні науки. Серія : Регіональна економіка*. 2014. Вип. 11. С. 95–101.
7. Загурський О. М. Транспортна доступність сільських територій: методологічні підходи. *Автомобільний транспорт*. 2018. Вип. 43. С. 65–70. DOI: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2018.43.0.65>
8. Лейберюк О. М. Транспортна доступність населення до центрів госпітальних округів (конкретний аналіз на прикладі Чернівецької обл.). *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія : Географічні науки*. 2017. Вип. 7. С. 62–68.
9. Магійчик О. М. Теоретичні аспекти реалізації транспортної доступності пасажирських транспортних систем. *Молодий вчений*. 2017. № 9. С. 467–470.

10. Сільченко Ю. Ю., Семенюк Л.Л., Зарубіна А. В. Аналіз впливу транспортної доступності на соціально-економічний розвиток Кіровоградської області. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: Географічні науки*. 2017. Вип. 7. С. 81-87.
11. Корнус А. Картографо-географічний аналіз транспортної доступності центрів громад Сумської області на основі теорії графів // *Earth Sciences, Geography, and Cartography: Regional Studies and Spatial Analysis : scientific monograph / Ed. board: R. Djakons, A. Kornus, O. Danylychenko, O. Kornus*. Riga : Baltija Publishing, 2025. 291-314 p. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-596-9-14>
12. Томашук М. М. Можливості геоінформаційного аналізу в дослідженнях транспортної доступності потенційних адміністративних центрів об'єднаних територіальних громад. *Інженерна геодезія*. 2018. Вип. 65. С. 126-135.
13. Третяк В. М., Лепетюк В. Б. Визначення транспортної доступності при формуванні туристичних маршрутів з допомогою QGIS та GRASS GIS. *Містобудування та територіальне планування*. 2021. Вип. 76. С. 297-307. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.76.297-307>
14. Уль А. В., Мельник О. В., Мельник Ю. А., Синій С. В. Геоінформаційне моделювання транспортної доступності територій. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2019. Вип. 12. С. 213-220. doi: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2019-2\(12\)-26](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2019-2(12)-26)
15. Яновський П. О., Матійчик О. М. Оцінка доступності пасажирського транспорту на регіональному рівні. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: Географічні науки*. 2013. № 3. С. 345-348.
16. Горошкова Л., Бакурова А., Сумець О., Триснюк В., Шумейко В. Математичне моделювання транспортно-логістичної інфраструктури для повного відновлення України. *Екологічна безпека та природокористування*. 2024. Вип. 50(2). С. 142-156. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.142-156>

References:

1. Puhach, S. O., Novosad, S. V. (2015). Traktuvannia poniat «transportna dostupnist» ta «stysnennia prostoru» u suchasni naukovi literaturi [Interpretation of the concepts "transport accessibility" and "space compression" in modern scientific literature]. Aktualni problemy krainoznavchoi nauky: materialy III Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii – Current issues of country studies: Proceedings of the 3rd International scientific and practical internet-conference (Lutsk, December 15–16, 2015). Lutsk: Vezha, pp. 28–31. [in Ukrainian].
2. Mazurova, A. V., Virchenko, P. A. (2012). Suspilno-geohrafichni chynnyky, yaki sprychyniaut transportnu dyskryminatsiiu naselennia Ukrainy (na prykladi zaliznychnoho transportu) [Socio-geographical factors causing transport discrimination of the population of Ukraine (on the example of railway transport)]. Rehiion – 2012: Stratehiia optymalnoho rozvytku: materialy naukovo-praktychnoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu – Region – 2012: Strategy of optimal development: Proceedings of the scientific and practical conference with international participation (Kharkiv, 2012). Kharkiv: V.N. Karazin Kharkiv National University, pp. 144–147. [in Ukrainian].
3. Anisimova, S.V., Vasenko, O.H., Anisimov, S.V. (2017). Otsinka transportnoi dostupnosti zamiskykh zon vidpochynku yak faktora, shcho vplyvaie na rekreatsiinu tsinnist terytorii [Assessment of transport accessibility of suburban recreation zones as a factor influencing the recreational value of the territory]. Avtomobilnyi transport – Automobile Transport, 41, 196–203. DOI: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2017.41.0.196> [in Ukrainian].
4. Baiteriakov, O.Z., Voronova, V.V. (2024). Topolohichni analiz avtomobilnoi transportnoi merezhi Zaporizkoi regioni [Topological analysis of the automobile transport network of Zaporizhzhia region]. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V.N. Karazina. Seriiia «Heolohiia. Heohrafiia. Ekolohiia» – Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series "Geology. Geography. Ecology", 60, 137–158. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-10> [in Ukrainian].
5. Barskyi, Yu.M., Puhach, S.O., Yakovlev, T.V. (2016). Prostorovyi analiz transportnoi dostupnosti terytorii u mezhakh mista Lutsk [Spatial analysis of transport accessibility of territories within the city of Lutsk]. Ekonomichni nauky. Seriiia: Rehionalna ekonomika – Economic Sciences. Series: Regional Economy, 13, 35–45. [in Ukrainian].
6. Dziubynska, O.V., Dziubynskyi, A.V., Smal, M.V. (2014). Otsinka transportnoi dostupnosti rekreatsiinykh terytorii Volynskoi regioni [Assessment of transport accessibility of recreational areas in Volyn region]. Ekonomichni nauky. Seriiia: Rehionalna ekonomika – Economic Sciences. Series: Regional Economy, 11, 95–101. [in Ukrainian].
7. Zahurskyi, O.M. (2018). Transportna dostupnist silskykh terytorii: metodolohichni pidkhody [Transport accessibility of rural areas: methodological approaches]. Avtomobilnyi transport – Automobile Transport, 43, 65–70. DOI: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2018.43.0.65> [in Ukrainian].
8. Leiberyuk, O.M. (2017). Transportna dostupnist naselennia do tsentriv hospitalnykh okruhiv (konkretnyi analiz na prykladi Chernivetskoii obl.) [Transport accessibility of the population to the centers of hospital districts (a case study of Chernivtsi region)]. Naukovyi visnyk Khersonskoho derzhavnogo universytetu. Seriiia: Heohrafichni nauky – Scientific Bulletin of Kherson State University. Series: Geographical Sciences, 7, 62–68. [in Ukrainian].
9. Matiichyk, O.M. (2017). Teoretychni aspekty realizatsii transportnoi dostupnosti pasazhyrskykh transportnykh system [Theoretical aspects of implementing transport accessibility of passenger transport systems]. Molodyi vchenyi – Young Scientist, 9, 467–470. [in Ukrainian].
10. Silchenko, Yu.Yu., Semeniuk, L.L., Zarubina, A.V. (2017). Analiz vplyvu transportnoi dostupnosti na sotsialno-ekonomichni rozvytok Kirovohradskoi regioni [Analysis of the impact of transport accessibility on the socio-economic development of Kirovohrad region]. Naukovyi visnyk Khersonskoho derzhavnogo universytetu. Seriiia: Heohrafichni nauky – Scientific Bulletin of Kherson State University. Series: Geographical Sciences, 7, 81–87. [in Ukrainian].
11. Kornus, A. (2025). Kartografo-geohrafichni analiz transportnoi dostupnosti tsentriv hromad Sumskoi regioni na osnovi teorii hrafiv [Cartographic and geographical analysis of transport accessibility of community centers in Sumy

region based on graph theory]. In: Djakons, R., Kornus, A.O., Danylychenko, O.S., Kornus, O.H. (Eds.), Earth Sciences, Geography, and Cartography: Regional Studies and Spatial Analysis. Baltija Publishing, Riga, pp. 291–314. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-596-9-14> [in Ukrainian].

12. Tomashchuk, M.M. (2018). Mozhyvosti heoinformatsiinoho analizu v doslidzhenniakh transportnoi dostupnosti potentsiinykh administratyvnykh tsestriv OTH [Possibilities of geoinformation analysis in the study of transport accessibility of potential administrative centers of amalgamated territorial communities]. Inzhenerna heodeziia – Engineering Geodesy, 65, 126–135. [in Ukrainian].

13. Tretiak, V.M., Lepetiuk, V.B. (2021). Vyznachennia transportnoi dostupnosti pry formuvanni turystychnykh marshrutiv z dopomohoiu QGIS ta GRASS GIS [Determining transport accessibility in the formation of tourist routes using QGIS and GRASS GIS]. Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia – Urban Development and Spatial Planning, 76, 297–307. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.76.297-307> [in Ukrainian].

14. Ul, A.V., Melnyk, O.V., Melnyk, Yu.A., Synii, S.V. (2019). Heoinformatsiine modeliuвання transportnoi dostupnosti terytorii [Geoinformation modeling of transport accessibility of territories]. Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi – Modern Technologies and Calculation Methods in Construction, 12, 213–220. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2019-2\(12\)-26](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2019-2(12)-26) [in Ukrainian].

15. Yanovskyi, P.O., Matiichyk, O.M. (2013). Otsinka dostupnosti pasazhyrskoho transportu na rehionalnomu rivni [Assessment of passenger transport accessibility at the regional level]. Naukoiemni tekhnolohii – Science-Intensive Technologies, 3, 345–348. [in Ukrainian].

16. Horoshkova, L., Bakurova, A., Sumets, O., Trysniuk, V., Shumeiko, V. (2024). Matematychnе modeliuвання transportno-lohistychnoi infrastruktury dlia poviennoho vidnovlennia Ukrainy [Mathematical modeling of transport and logistics infrastructure for post-war recovery of Ukraine]. Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia – Ecological Safety and Environmental Management, 50(2), 142–156. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.142-156> [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 26.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025

ГІС ДЛЯ ЕКОТУРИЗМУ: ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА, КАРТОГРАФУВАННЯ ТА ОСВІТА

Король Олена Миколаївна,

кандидат педагогічних наук,
доцент, доцент кафедри загальної та регіональної географії
Сумського державного педагогічного університету імені А. С. Макаренка
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0175-3824>
Scopus Author ID: 57218827420
Web of Science Researcher ID: GQP-2959-2022

Корнус Анатолій Олександрович,

кандидат географічних наук,
доцент, доцент кафедри загальної та регіональної географії
Сумського державного педагогічного університету імені А. С. Макаренка
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5924-7812>
Scopus Author ID: 57198508125
Web of Science Researcher ID: O-6053-2015

Корнус Олеся Григорівна,

кандидат географічних наук,
доцент, завідувач кафедри загальної та регіональної географії
Сумського державного педагогічного університету імені А. С. Макаренка
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7469-7291>
Scopus Author ID: 57198491514
Web of Science Researcher ID: AAB-6700-2021

Данильченко Олена Сергіївна,

кандидат географічних наук,
доцент, доцент кафедри загальної та регіональної географії
Сумського державного педагогічного університету імені А. С. Макаренка
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2881-843X>
Scopus Author ID: 58090023000
Web of Science Researcher ID: ABS-0308-2022

Луценко Сергій Вікторович,

доктор філософії,
старший викладач кафедри загальної та регіональної географії
Сумського державного педагогічного університету імені А. С. Макаренка
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9250-6700>
Scopus Author ID: 57222478619
Web of Science Researcher ID: ABR-9502-2022

У статті розглядаються можливості застосування геоінформаційних систем (ГІС) у розвитку екологічного туризму з акцентом на три взаємопов'язані напрями: екологічну оцінку територій, картографування туристичних маршрутів і формування екологічної свідомості в освітньому середовищі. На прикладі сучасних програмних продуктів – ArcGIS Pro, QGIS, Google Earth, Google Earth Pro, Google My Maps – продемонстровано їх роль у створенні картосхем, побудові багатопланових баз даних, організації польових досліджень та моніторингу стану навколишнього середовища.

Окрему увагу приділено застосуванню ГІС у процесі екологічної оцінки природних територій та туристичних об'єктів. Завдяки можливостям аналізу просторових даних можна відстежувати антропогенне навантаження, контролювати використання природних лікувальних ресурсів і планувати стратегії сталого розвитку рекреаційних зон. Показано, що картографічне відображення туристичних маршрутів забезпечує зручність у плануванні подорожей, а також виступає дієвим інструментом для підвищення туристичної привабливості регіонів. Приклади побудови екомаршрутів у межах Путивльського туристичного кластера і картографування басейну річки Ворскли підтверджують практичну значущість використання ГІС у туристичній сфері.

Водночас стаття акцентує увагу на освітньому потенціалі геоінформаційних технологій. Їхнє використання у навчальному процесі сприяє набуттю практичних навичок у студентів, формуванню екологічної культури та усвідомленню важливості збереження природного середовища. В умовах воєнного часу та обмеженого доступу до низки територій ГІС виступає

ефективним засобом для віддаленого картографування, організації віртуальних маршрутів і дослідницьких проєктів. Таким чином, впровадження ГІС у сферу екотуризму дозволяє поєднати науково обґрунтовану екологічну оцінку, просторово-картографічний аналіз і навчально-виховну функцію, що робить цей інструментарій надзвичайно актуальним для забезпечення сталого розвитку туризму в Україні.

Ключові слова: екотуризм, ГІС-технології, ArcGis Pro, QGIS, Google Earth, Google Earth Pro, ArcGIS Field Maps, освітня діяльність.

Korol Olena, Kornus Anatolii, Kornus Olesia, Danylchenko Olena, Lutsenko Serhii. GIS for Ecotourism: Environmental Assessment, Mapping, and Education

The article discusses the possibilities of applying geographic information systems (GIS) in the development of ecological tourism with a focus on three interrelated areas: ecological assessment of territories, mapping of tourist routes, and the formation of ecological awareness in the educational environment. Using the example of modern software products – ArcGIS Pro, QGIS, Google Earth, Google Earth Pro, Google My Maps – their role in creating maps, building multi-layered databases, organizing field research, and monitoring the state of the environment is demonstrated.

Special attention is paid to the use of GIS in the process of environmental assessment of natural areas and tourist sites. Thanks to the capabilities of spatial data analysis, it is possible to track anthropogenic load, control the use of natural healing resources, and plan strategies for the sustainable development of recreational areas. It has been shown that the cartographic representation of tourist routes facilitates travel planning and is also an effective tool for increasing the tourist attractiveness of regions.

Examples of eco-routes within the Putivl tourist cluster and mapping of the Vorskla River basin confirm the practical significance of using GIS in the tourism sector.

At the same time, the article focuses on the educational potential of geoinformation technologies. Their use in the educational process contributes to the acquisition of practical skills by students, the formation of an ecological culture, and an awareness of the importance of preserving the natural environment. In wartime conditions and with limited access to a number of territories, GIS is an effective tool for remote mapping, organizing virtual routes, and research projects. Thus, the introduction of GIS into the field of ecotourism allows for the combination of scientifically based environmental assessment, spatial and cartographic analysis, and educational functions, making this tool extremely relevant for ensuring the sustainable development of tourism in Ukraine.

Key words: ecotourism, GIS technologies, ArcGIS Pro, QGIS, Google Earth, Google Earth Pro, Google My Maps, educational activities.

Вступ. Питанням дослідження екотуризму засобами ГІС-технологій приділена увага багатьох авторів. Так, застосуванню геоінформаційних систем у плануванні екологічного туризму присвячені дослідження Короля О. Д. і Красько, А. Б. [6]; особливостям застосування інформаційних технологій в туризмі, позитивним та негативним моментам, які виникають під час віртуальних екскурсій та надмірному використанню інформаційних технологій присвячені дослідження Табенської О. І. [8]; використанню геоінформаційних технологій в організації екологічного туризму присвячені роботи Сонька С. П. [8]; продуктам ГІС-технологій для підвищення туристичної привабливості дестинації присвячено дослідження В. Б. Лепетюк [5]; Косенко Ю. Ю. присвятив своє дослідження застосуванню сучасних геоінформаційних технологій у розвитку екологічного туризму [4]. Але серед цих досліджень не приділено достатньої уваги огляду геоінформаційних технологій та їх відповідному застосуванню для формування навичок екотуризму.

Метою статті є аналіз ГІС-технологій, що застосовуються в екотуризмі, зокрема для картографування та моніторингу територій, а також визначення їхнього потенціалу у формуванні екологічної свідомості та практичних навичок користувачів.

Матеріали і методи. У формуванні навичок екотуризму засобами ГІС-технологій було застосовано ряд методів, основні з них: аналіз, синтез та картографічний. В дослідженні проводиться аналіз засобів – геоінформаційних технологій, за допомогою яких досліджується природний простір, об'єкти природного і антропогенного походження, а також проводиться

аналіз традиційних принципів екотуризму через призму застосування ГІС-технологій тощо. Синтез – метод, протилежний аналізу, за допомогою якого досліджується явище в цілому на основі узагальнення споріднених елементів та їх об'єднання (наприклад, на основі туристичних об'єктів та об'єктів інфраструктури оцінюється туристичний потенціал регіону). Застосування картографічного методу дозволяє за допомогою карт наочно зобразити фактори і особливості розміщення туристичних об'єктів та прокладання маршрутів.

В наш час перелік туристичних об'єктів не є сталим. Україна має багату історичну спадщину, а також володіє унікальними природними ресурсами, які і становлять основу екологічного туризму [1-3]. В умовах же перманентної економічної кризи розвиток екологічного туризму України може посприяти її відродженню, забезпечивши нові робочі місця. Екотуризм – вид туризму, що характерний для місцевостей які можуть бути розташовані на територіях різних національних та природних парків, заповідних зон, де передбачено обмеження впливу на територію, а також заборонені види розважального відпочинку, що можуть вплинути на екологію даної території [9]. Для розвитку екологічного туризму потрібна певна інформаційна база, яка б відбивала розміщення окремих туристичних об'єктів. Для створення такої бази можуть бути використані геоінформаційні технології [7].

За визначенням Міжнародна асоціація екотуризму (TIES), екотуризм – це відповідальна подорож до природних територій, яка захищає довкілля та покращує добробут місцевих громад [10]. TIES сформулювала 10 принципів екотуризму (рис. 1).

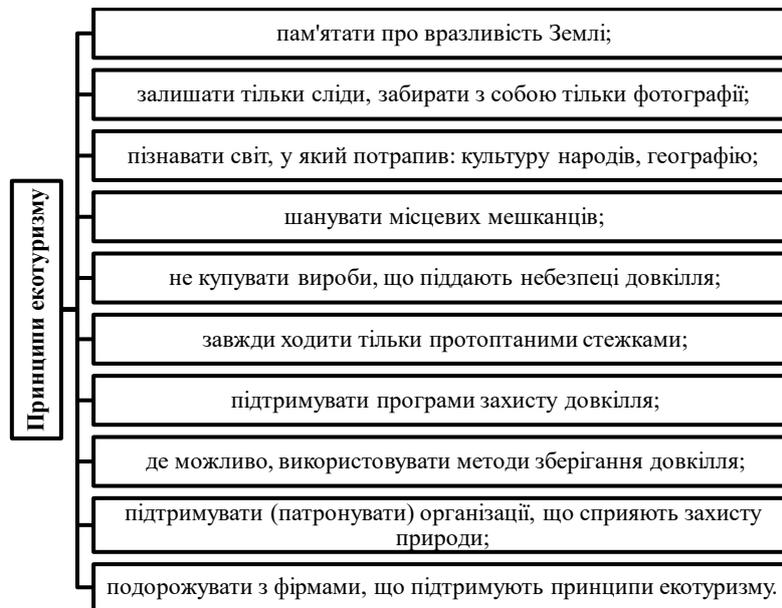


Рис. 1. Принципи екотуризму

З цих позицій екологічний туризм можна вважати головною концептуальною ідеєю сталого розвитку туристичної індустрії у XXI сторіччі.

Базуючись на принципах екотуризму із застосуванням засобів ГІС-технологій, виникає можливість активної організації екологічних турів, що дозволять пересічному споживачу (як то екскурсоводу, або ж туристичній фірмі) активно їх використовувати. В освітній діяльності використання ГІС-технологій сприяє формуванню навичок екотуризму.

В якості ГІС середовища для формування навичок екотуризму можуть виступати геоінформаційні системи різного типу і напрямлення. Це можуть бути: демонстраційні ГІС, онлайн ГІС ресурси, стільникове ГІС програмне забезпечення, вільні ГІС-додатки і комерційні ГІС системи.

Зауважимо, що ГІС класифікують за різними критеріями: функціональність, масштабом застосування та доступністю.

Функціональні можливості світового надбання ГІС дуже широкі. Серед спектру геоінформаційних систем існують: безкоштовні і комерційні ГІС, онлайн-ресурси, стільникові і мобільні версії ГІС. Серед комерційних ГІС іноді пропонуються варіанти доступу до ГІС за зниженими цінами або у вигляді спеціальних ліцензованих пропозицій (навчальні ліцензії).

Розглянемо світові пропозиції онлайн ресурсів, які дозволяють працювати з географічними даними без встановлення стільникового забезпечення. А також допомагають досліджувати географічні явища, створювати проекти та відкривати нові аспекти світу навколо нас (рис. 2).

Більш потужним геопросторовим засобом є стільникове ГІС-програмне забезпечення. Його встановлюють на локальні комп'ютери без постійного підключення до Інтернету. Популярні стільникові ГІС-програм представлені на рис. 3.

Обираючи стільникове програмне геоінформаційне забезпечення треба пам'ятати про відповідність апаратної складової комп'ютера.

Результати. Аналіз ГІС-продуктів дав можливість визначитися з ГІС-технологіями для нашого дослідження щодо формування навичок екотуризму. Серед ГІС-технологій обрані наступні засоби:

- комерційні продукти ArcGis від компанії ESRI;
- вільний програмний засіб QGis;
- Google Earth; Google Earth Pro;
- Google My maps.

Саме на їх основі є можливість продемонструвати основні результати – формування навичок екотуризму в освітній діяльності. Так Google Earth і My maps широко використовують для візуалізації розташування об'єктів і прокладання маршрутів, як це зроблено для туристичних маршрутів по м. Путивль (рис. 4).

Приклад прокладання екомаршруту Путивльщиною засобами програми Google Earth Pro зображено на рис. 5.

Слід приділити увагу формуванню екологічної свідомості студентів завдяки використанню ГІС-технологій, набутті практичних навичок екотуристичної поведінки, оцінки студентами корисності ГІС-технологій під час здобуття екотуристичних навичок під час дослідної діяльності та виконанні наукового проекту.

Наприклад, виконання навчального проекту передбачає створення брошури, на внутрішній стороні якої зображена карта, а на звороті може бути розташований список туристичних визначних пам'яток з примітками екологічного характеру. Також додається інформація, що допоможе туристам знайти найближчу залізничну станцію до кожної туристичної пам'ятки (рис. 6).

Прикладом іншого проекту може бути прокладання річкового маршруту та її притоки, а також нанесення точок – ділянок, що демонструють екологічний стан річки (рис. 7) (на прикладі р. Ворскли).

Google Earth
<ul style="list-style-type: none"> • надає доступ до інтерактивних 3D-карт та аерознімків. Ви можете досліджувати різні об'єкти, дізнаватися про географічні особливості різних регіонів і використовувати його для створення презентацій та проєктів
ArcGIS Online
<ul style="list-style-type: none"> • онлайн-сервіс від Esri, який надає можливість створення і редагування карт, аналізу геоданих та спільної роботи з іншими користувачами
OpenStreetMap (OSM)
<ul style="list-style-type: none"> • вільно доступна та редагована спільнотою мапа світу. Ви можете редагувати геодані на OSM та використовувати її у своїх проєктах
QGIS Cloud
<ul style="list-style-type: none"> • хмарний сервіс для створення та опублікування карт, створених в QGIS (географічна інформаційна система з відкритим вихідним кодом)
Mapbox
<ul style="list-style-type: none"> • дозволяє створювати та вбудовувати інтерактивні карти у веб-сайти та додатки, використовується для налаштування карт та додавання своїх сайтів
CARTO
<ul style="list-style-type: none"> • це платформа для аналізу та візуалізації географічних даних. Ви можете створювати інтерактивні карти та проводити аналіз геоданих в режимі реального часу

Рис. 2. Онлайн ГІС-ресурси

Esri ArcGIS Desktop
<ul style="list-style-type: none"> • це одне з найпоширеніших стільникових ГІС-програм, яке надає широкі можливості для створення, редагування, аналізу та візуалізації геоданих. Включає ArcMap та ArcGIS Pro для різних геоаналітичних завдань
QGIS
<ul style="list-style-type: none"> • вільно доступна ГІС-програма з відкритим вихідним кодом, яка надає широкий функціонал для роботи з геоданими. Вона підтримує різні форми даних і має активну спільноту користувачів
GRASS GIS
<ul style="list-style-type: none"> • вільно доступна програма з відкритим вихідним кодом, що спеціалізується на аналізі географічних даних та надає інструменти для роботи з геоданими на високому рівні
MapInfo Professional
<ul style="list-style-type: none"> • комерційне ГІС-програмне забезпечення, яке спеціалізується на аналізі і візуалізації геоданих. Воно широко використовується в галузі бізнесу та має потужні аналітичні інструменти
Global Mapper
<ul style="list-style-type: none"> • комерційне ГІС-програмне забезпечення, яке надає інструменти для створення та аналізу географічних даних. Воно також підтримує багато різних форматів даних
Manifold
<ul style="list-style-type: none"> • комерційне програмне забезпечення, яке надає широкий функціонал для аналізу та обробки геоданих, а також підтримує обчислення на основі паралельної обробки
AutoCAD Map 3D
<ul style="list-style-type: none"> • ГІС-розширення для AutoCAD, яке дозволяє інтегрувати геодані в проєктах CAD і використовувати їх для створення геоданих карт та аналізу

Рис. 3. Стільникові ГІС



Рис. 4. Схеми екскурсійних маршрутів по території м. Путивля [11]

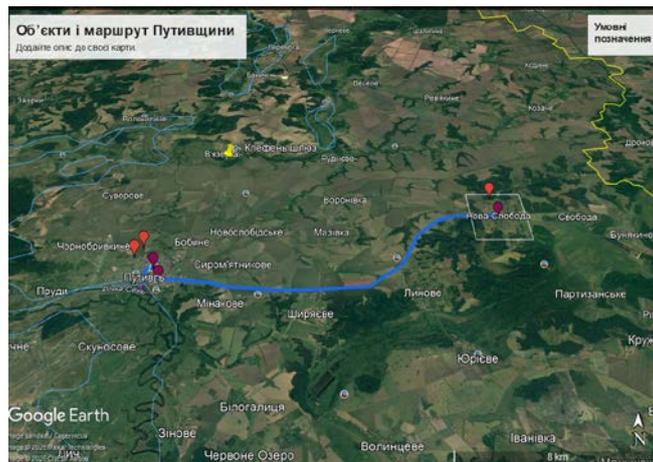


Рис. 5. Туристичний маршрут Путивщиною



Рис. 6. Зображення туристичної карти, створеної в ArcGis Pro: точкові – туристичні об'єкти, а лінійні – шляхи та полігони – станції



Рис. 7. Карти, створені засобами QGIS: точкові – ділянки, що демонструють екологічний стан річки; лінійні – р. Ворскла та її притоки

Поданий вище аналіз найбільш ефективних геоінформаційних засобів та наведені приклади, підкреслюють можливість формування навичок екотуризму в освітній діяльності. ГІС-технології, а також порівняння їх освітніх можливостей з традиційними методами навчання, вказує на необхідність впровадження ГІС-технологій в екотуристичному навчанні. Використання ГІС-технологій дозволяє зробити екотуризм

більш ефективним, стійким та безпечним, а також формувати у туристів та місцевого населення екологічну свідомість.

Серед навичок екотуризму, що розвиваються за допомогою ГІС-технологій, можна виділити наступні (рис. 8):

Висновки. Впровадження ГІС-технологій в процес формування екотуристичних навичок під час освітньої

Просторове мислення:
<ul style="list-style-type: none"> Розуміння зв'язків між географічним положенням, природними особливостями та екологічними процесами.
Робота з картографічними даними:
<ul style="list-style-type: none"> Вміння читати, аналізувати та використовувати карти для планування та управління.
Екологічна свідомість:
<ul style="list-style-type: none"> Розуміння впливу людської діяльності на довкілля та необхідності сталого використання природних ресурсів.
Навігація та орієнтування:
<ul style="list-style-type: none"> Використання GPS-пристроїв та мобільних додатків на основі ГІС для навігації на місцевості.
Управління інформацією:
<ul style="list-style-type: none"> Збір, обробка та аналіз даних про екосистеми, туристичні об'єкти та маршрути.
Комунікація та співпраця:
<ul style="list-style-type: none"> Спільна робота з іншими учасниками екотуризму для планування та управління туристичною діяльністю.
Приклади використання ГІС у формуванні навичок екотуризму:
<ul style="list-style-type: none"> Створення інтерактивних карт туристичних маршрутів з інформацією про об'єкти природи, місця для відпочинку, обмеження та правила поведінки. Розробка мобільних додатків для навігації по екотуристичних маршрутах, з інформацією про рослини, тварин, геологічні об'єкти. Проведення онлайн-курсів та тренінгів з екотуризму, з використанням ГІС-інструментів для аналізу та візуалізації даних. Створення систем моніторингу стану екосистем та відстеження впливу туристичної діяльності.

Рис. 8. Навички, що формуються і розвиваються за допомогою ГІС-технологій в екологічному туризмі

діяльності на сьогодні є популярним напрямком, починаючи з Covid-19, а також залишається затребуваним впродовж військового вторгнення, коли більшість територій є недоступними для відвідування.

Завдяки ГІС-технологіям є можливість здійснювати моніторинг рекреаційно-туристичних територій, реалізовувати ревізійні заходи щодо використання природних лікувальних ресурсів, а також контролю-

вати антропогенне навантаження навколо цих об'єктів і територій.

Використання ГІС-технологій дозволяє зробити екотуризм більш ефективним, стійким та безпечним, а також формувати у туристів та місцевого населення екологічну свідомість.

Ці засоби можуть бути рекомендовані для викладачів та вчителів географії.

Література:

1. Мелконян Г. А. Впровадження ГІС-технологій у туристичній сфері // Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки: Матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Рівне, 10 травня 2019 р.). Рівне: НУВГП, 2019. С.400. URL: https://tourlib.net/statti_ukr/melkonyan.htm (дата звернення 20.08.2025).
2. Екотуризм – Стежки та мапи. URL: <https://stzhky.org/stzhky/stalyj-turyzm/ekoturyzm/> (дата звернення 20.08.2025).
3. Екотуризм в Україні: гармонія з природою та цікаві маршрути – relax URL: <https://relax.com.ua/uk/what-to-do/outdoors/ekoturizm-v-ukrayini-garmoniya-z-prirodoyu-ta-tsikavi-marshruti/> (дата звернення 20.08.2025).
4. Косенко Ю. Ю. Застосування сучасних геоінформаційних технологій у розвитку екологічного туризму. *Науковий вісник Херсонського державного університету*. 2018. Вип. 9. С. 233-238.
5. Lepetiuk V. B. The GIS technologies' products for increasing the tourist attractiveness of the destination (on the example of Chernigiv region). *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*. 2020. Vol. 92. P. 55-67. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcgap2020.92.055>
6. Новікова А. Особливості використання ГІС-технологій у процесі навчання фахівців туристичної галузі. *Вища освіта України*. 2025. № 1. DOI: [https://doi.org/10.32782/NPU-VOU.2025.1\(96\).05](https://doi.org/10.32782/NPU-VOU.2025.1(96).05).
7. Сонько С.П. Використання геоінформаційних технологій в організації екологічного туризму (на прикладі об'єктів ПЗФ Черкаської області). *Теорія, практика та інновації розвитку туристичної та готельно-ресторанної індустрії: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції* (28-29 травня 2015 р.). Умань: Вид.-полігр. центр «Візаві», 2015. С.127-132. URL: <https://www.udau.edu.ua/assets/files/zborniki/papers/sonko/GiS-v-ekologichnomu-turizmi.pdf> (дата звернення 20.08.2025).
8. Табенська О.І. Особливості застосування інформаційних технологій в туризмі. *Інтелект XXI*. 2025. № 1. С. 35-42. URL: http://www.intellect21.nuft.org.ua/journal/2025/2025_1/8.pdf (дата звернення 20.08.2025).
9. Що таке екотуризм і чому він важливий? URL: <https://waytravel.com.ua/shho-take-ekoturyzm-i-chomu-vin-vazhlyvyj.html> (дата звернення 20.08.2025).
10. TIES Overview. URL: <https://ecotourism.org/ties-overview/> (дата звернення 20.08.2025).
11. Горбовцов Г. М., Корнус А. О., Тупик С. В., Фурсеєв О. В.. Традиційні та нові односторонні екскурсійні маршрути (тури) в межах Путивльського туристичного кластера. *Четверті Сумські наукові географічні читання: збірник матеріалів Всеукраїнської наукової конференції* (Суми, 11-13 жовтня 2019 р.). Суми. 2019. С. 41-49. URL: <https://repository.sspu.edu.ua/handle/123456789/7876>

References:

1. Melkonian, H. A. (2019). Vprovadzhennia HIS-tekhnohohii u turystychnii sferi [Implementation of GIS technologies in the tourism sector]. *Problemy ta perspektyvy rozvytku suchasnoi nauky: Materialy Mizhnar. nauk.-prakt. konf. (m. Rivne, 10 travnia 2019 r.)*. Rivne: NUVHP, 2019. S. 400. URL: https://tourlib.net/statti_ukr/melkonyan.htm (accessed: 20.08.2025) [in Ukrainian].
2. Ekoturyzm – Stezhky ta mapy (2025). [Ecotourism – Trails and maps]. URL: <https://stzhky.org/stzhky/stalyj-turyzm/ekoturyzm/> (accessed: 20.08.2025) [in Ukrainian].
3. Ekoturyzm v Ukraini: harmoniia z pryrodou ta tsikavi marshruty – relax (2025). [Ecotourism in Ukraine: harmony with nature and interesting routes – relax]. URL: <https://relax.com.ua/uk/what-to-do/outdoors/ekoturizm-v-ukrayini-garmoniya-z-prirodoyu-ta-tsikavi-marshruti/> (accessed: 20.08.2025) [in Ukrainian].
4. Kosenko, Yu. Iu. (2018). Zastosuvannia suchasnykh heoinformatsiinykh tekhnolohii u rozvytku ekolohichnoho turyzmu [Application of modern geoinformation technologies in the development of ecological tourism]. *Naukovyi visnyk Khersonskoho derzhavnogo universytetu. Seria Geographichni nauky – Scientific Bulletin of Kherson State University. Series «Geographical Sciences»*. URL: <https://ekhsuir.kspu.edu/server/api/core/bitstreams/dd6fc725-f539-417b-8de7-ad934cd16e0b/content> (accessed: 20.08.2025) [in Ukrainian].
5. Lepetiuk, V.B. (2020). The GIS technologies' products for increasing the tourist attractiveness of the destination (on the example of Chernigiv region). *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*. Vol. 92. P. 55-67. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcgap2020.92.055>
6. Novikova, A. Osoblyvosti vykorystannia HIS-tekhnohohii u protsesi navchannia fakhivtsiv turystychnoi haluzi [Features of the use of GIS technologies in the process of training specialists in the tourism industry]. *Vyscha osvita Ukrainy – Higher Education of Ukraine*. DOI: [https://doi.org/10.32782/NPU-VOU.2025.1\(96\).05](https://doi.org/10.32782/NPU-VOU.2025.1(96).05) [in Ukrainian].
7. Sonko, S.P. Vykorystannia heoinformatsiinykh tekhnolohii v orhanizatsii ekolohichnoho turyzmu (na prykladi ob'ektiv PZF Cherkaskoi oblasti) [The use of geographic information technologies in the organization of ecological tourism (on the example of protected areas of Cherkasy region)]. *Teoriia, praktyka ta innovatsii rozvytku turystychnoi ta hotelno-restoranoi industrii: Materialy Mizhnarodnoi nauково-praktychnoi konferentsii* (28–29 travnia 2015 r.). Uman: Vyd.-polihraf.

tsentr "Vizavi", 2015, pp. 127–132. URL: <https://www.udau.edu.ua/assets/files/zbirniki/papers/sonko/GiS-v-ekologich-nomu-turizmi.pdf> (accessed: 20.08.2025) [in Ukrainian].

8. Tabenska, O.I. (2025). Osoblyvosti zastosuvannia informatsiinykh tekhnolohii v turyzmi. [Peculiarities of the use of information technology in tourism]. *Intelekt XXI – Intellect XXI*. № 1. URL: http://www.intellect21.nuft.org.ua/journal/2025/2025_1/8.pdf (accessed: 20.08.2025) [in Ukrainian].

9. Shcho take ekoturizm i chomu vin vazhlyvyi? (2025). [What is ecotourism and why is it important?]. URL: <https://waytravel.com.ua/shho-take-ekoturizm-i-chomu-vin-vazhlyvyj.html> (accessed: 20.08.2025) [in Ukrainian].

10. TIES Overview (2025). URL: <https://ecotourism.org/ties-overview/> (accessed: 20.08.2025).

11. Horbovtsov, H. M., Kornus, A. O., Tupyk, S. V., Fursieiev, O. V. (2019). Tradytsiini ta novi odnodnenni ekskursionni marshruty (tury) v mezhakh Putyvlskoho turystychnoho klastera [Traditional and New One-Day Excursion Routes (Tours) within the Putyvl Tourism Cluster]. *Chetverti Sumski naukovi heohrafichni chytannia: zbirnyk materialiv Vseukrainskoi naukovoï konferentsii (Sumy, 11–13 zhovtnia 2019 r.)*. pp. 41–49. URL: <https://repository.sspu.edu.ua/handle/123456789/7876> [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 26.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 26.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025

СУСПІЛЬНО-ГЕОГРАФІЧНИЙ АНАЛІЗ ЕКОНОМІЧНИХ ТРАНСФОРМАЦІЙ ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ В УМОВАХ ВІЙНИ

Маляренко Костянтин Олександрович,
здобувач третього рівня вищої освіти ОНП «Географія»
Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-1306-7702>

Сегіда Катерина Юріївна,
доктор географічних наук, професор,
професор кафедри соціально-економічної географії і регіоназнавства імені Костянтина Немця,
Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1122-8460>

Дослідження економічних трансформацій, спричинених повномасштабним вторгненням Російської Федерації в Україну, є важливим для розуміння не лише масштабів руйнувань, а й закономірностей адаптації та відновлення. До 2022 року Харківська область посідала одне з ключових місць в економіці України, виступаючи важливим полюсом зростання, що поєднував потужний промисловий потенціал із динамічним розвитком третинного сектору та науково-освітнім комплексом. Дослідження економічних трансформацій Харківської області, яка стала прифронтовим регіоном, набуває особливої актуальності, враховуючи всі нові умови та чинники. Метою цієї статті є виявлення особливостей економічних перетворень в Харківській області впродовж років повномасштабної війни на засадах суспільної географії.

У статті охарактеризовано структуру економіки Харківської області та її місце в загальнонаціональному вимірі до початку повномасштабної війни; окреслено зміни в економіці після 2022 року, досліджено динаміку бізнес-релокації, трансформацію ключових економічних секторів та їхню стійкість; проведено порівняльний аналіз податкових надходжень за 2023–2025 роки для визначення місця регіону в національному вимірі та виявлення зрушень у структурі економіки; сформульовано ключові напрями та рекомендації для сталого відновлення, проаналізовано основні положення та пріоритети регіональної програми відбудови та розвитку Харківської області. Економіка Харківської області пережила глибоку трансформацію. Завдяки резистентності ключових секторів, зокрема ІТ та оборонно-промислового комплексу, а також фіскальній життєздатності, підтвердженій показниками податкових надходжень, Харківщина утримує достатньо високі позиції серед інших регіонів України. Водночас просторова поляризація в регіоні посилилася, створивши глибокий розрив між відносно стабільним міським центром та прифронтовою периферією.

Ключові слова: регіональний розвиток, соціально-економічний розвиток, економічні перетворення, Харківська область, Україна, суспільно-географічний підхід.

Maliarenko Kostiantyn, Sehida Kateryna. Human-geographical features of economic transformations in the Kharkiv region

The study of economic transformations caused by the full-scale invasion of the Russian Federation into Ukraine is crucial for understanding not only the extent of destruction but also the patterns of adaptation and recovery. Until 2022, Kharkiv Region held a key position in Ukraine's economy, serving as an important growth hub that combined a powerful industrial potential with the dynamic development of the tertiary sector and a strong scientific and educational complex. The study of economic transformations in Kharkiv Region, which has become a frontline region, is of particular relevance given all the new conditions and factors that have emerged. The purpose of this article is to identify the features of economic transformations in Kharkiv Region during the years of the full-scale war, based on the principles of human geography. The article describes the structure of Kharkiv Region's economy and its place in the national context before the full-scale war; outlines the changes in the economy after 2022, and examines the dynamics of business relocation, the transformation of key economic sectors, and their resilience. It also provides a comparative analysis of tax revenues for 2023–2025 to determine the region's position nationally and identify shifts in its economic structure. The article formulates key directions and recommendations for sustainable recovery and analyzes the main provisions and priorities of the regional program for the reconstruction and development of Kharkiv Region. The economy of Kharkiv Region has undergone a profound transformation. Thanks to the resilience of key sectors, particularly the IT and defense industries, as well as fiscal viability confirmed by tax revenue indicators, Kharkiv Region has turned into a "pole of resilience." At the same time, spatial polarization in the region has intensified, creating a deep divide between the relatively stable urban center and the frontline periphery.

Key words: regional development, socio-economic development, economic transformations, Kharkiv Region, Ukraine, human geographical approach.

Вступ. Економічний розвиток регіонів традиційно є одним з ключових об'єктів суспільно-географічних досліджень. Він розглядається як складний, багатоспектрний і багаторівневий процес якісних змін у про-

сторовій організації, населенні та господарстві регіонів [6, 8]. Дослідження економічних трансформацій, спричинених повномасштабним вторгненням Російської Федерації в Україну, є важливим для розуміння

не лише масштабів руйнувань, а й закономірностей адаптації та відновлення. У цьому контексті Харківська область є унікальним об'єктом для наукового аналізу. До 2022 року регіон посідав одне з ключових місць в економіці України, виступаючи важливим полюсом зростання, що поєднував потужний промисловий потенціал із динамічним розвитком третинного сектору та науково-освітнім комплексом. Тож, дослідження економічних трансформацій Харківської області, яка стала прифронтовим регіоном, набуває особливої актуальності, враховуючи всі ті нові умови та чинники, які утворилися.

Матеріали та методи. Аналіз економічних перетворень в Україні, зокрема у Харківській області, вимагає нового методологічного підходу, що враховує вплив воєнного стану. Суспільно-географічна наука вивчає нерівномірність регіонального розвитку та просторову поляризацію [8], базувалася на стабільних умовах і доступності широкого спектра офіційних статистичних даних. Наслідки повномасштабного вторгнення Росії в Україну докорінно змінили умови для проведення досліджень, адже дані офіційної статистики для аналізу поточної соціально-економічної ситуації стали недоступними, що вимагає переосмислення підходів до оцінки регіонального розвитку та пошуку нових інструментів, змушує дослідників переходити від традиційних методів до альтернативних, які ґрунтуються на оперативних, хоч і агрегованих, даних, таких як фіскальні показники тощо. Дані, що використовувалися в роботі, були отримані з офіційних звітів місцевих та державних органів влади, у тому числі – Програм та Стратегій розвитку регіону [10, 14], аналітичних платформ (зокрема, Opendatobot [4]), інтерактивної податкової карти України [9], інформації із публікацій у профільних ЗМІ тощо.

Метою цієї статті є виявлення особливостей економічних перетворень в Харківській області впродовж років повномасштабної війни на засадах суспільної географії. Для досягнення поставленої мети були визначені дослідницькі завдання: охарактеризувати структуру економіки Харківської області та її місце в загальнонаціональному вимірі до початку повномасштабної війни; окреслити зміни в економіці після 2022 року, дослідити динаміку бізнес-релокації, трансформацію ключових економічних секторів та їхню стійкість; провести порівняльний аналіз податкових надходжень за 2023–2025 роки для визначення місця регіону в національному вимірі та виявлення зрушень у структурі економіки; сформулювати ключові напрями та рекомендації для сталого відновлення, проаналізувати основні положення та пріоритети регіональної програми відбудови та розвитку Харківської області.

Результати. До початку повномасштабного вторгнення Харківська область посідала одне з ключових місць в економіці України. За даними 2021 року, валовий регіональний продукт (ВРП) області становив 319,796 мільйона гривень, що дозволило їй зайняти третє місце серед регіонів країни, поступаючись лише Києву та Дніпропетровській області, а до 2014 року –

ще й Донецькій області [2]. Ця позиція підкреслювала статус Харківщини як одного з провідних промислових, аграрних та наукових центрів і згідно з офіційними статистичними даними, протягом 2004–2021 років частка Харківської області у загальному ВВП країни становила від 5,6% (2012, 2013 рр.) до 6,5% (2009, 2016 рр.) [2]. У 2021 році частка Харківської області у загальному ВВП країни становила від 5,9% [2]. Показник валового регіонального продукту у розрахунку на одну особу в Харківській області у 2021 році становив 122 227 грн, відповідно, область займала шосте місце і поступалася лише м. Київ, Полтавській, Дніпропетровській, Київській, Запорізькій областям [2]. У структурі економіки Харківської області 38% припадає на послуги, 24% – на промисловість, 13% – на торгівлю, 12% – на сільське господарство, 11% – на транспорт та зв'язок [14]. Ці економічні показники слугують важливою точкою відліку для подальшого аналізу впливу воєнних дій на економічну структуру та майбутній потенціал регіону. Прогнози на 2021 рік передбачали подальший розвиток, з базовим сценарієм, що очікував індекс промислової продукції на рівні 98,9%, та цільовим сценарієм, що передбачав зростання до 101,3% [10].

Економіка Харківської області характеризувалася багатогалузевим промисловим комплексом, де провідну роль відігравали машинобудування, паливно-енергетична, хіміко-фармацевтична та харчова промисловість [14]. У структурі переробної промисловості понад дві третини обсягів реалізованої продукції припадали на виробництво харчових продуктів (40%) та машинобудування (11,6%), виробництво коксу та продуктів нафтоперероблення, добувна промисловість і розроблення кар'єрів [14]. Важливу роль в економіці регіону відіграв агропромисловий комплекс. За площею сільськогосподарських угідь (2,4 мільйона гектарів, що складає 76,7% загальної території області) Харківщина посідала третє місце в Україні. Рослинництво становило 84,1% валового виробництва сільського господарства, а тваринництво – 15,9% [10, 14, 15, 16]. Особливою рисою довоєнного профілю Харківщини був її інтелектуальний та інноваційний потенціал. До 2022 року в місті було розташовано 80 закладів вищої освіти, а загальна кількість студентів в області становила 123 208 осіб, що робило її другою після Києва за цим показником [10, 14]. Крім того, на Харківщині активно розвивався ІТ-сектор, який налічував понад 50 тисяч фахівців у понад 500 компаніях [1], що є потужним ресурсом та передумовою для постіндустріального розвитку. Його мобільність і незалежність від фізичної інфраструктури згодом виявилися ключовими чинниками стійкості регіону в умовах війни.

Повномасштабне вторгнення Російської Федерації завдало колосальних збитків економіці та інфраструктурі Харківської області. Близько 61% території області зазнало впливу бойових дій, що призвело до значних руйнувань та прямих економічних втрат. Постійні обстріли цивільної та виробничої інфраструктури стали ключовим фактором, що зумовлює призупинення діяльності підприємств та відтік населення. Восени

2022 року Збройні Сили України здійснили успішний контрнаступ, який став одним із найбільш значущих подій у воєнній історії регіону. У його результаті було визволено понад 400 населених пунктів та відновлено контроль над тисячами квадратних кілометрів території. Зокрема, українські сили звільнили такі міста, як Ізюм та Куп'янськ, а також вийшли до державного кордону в районі Вовчанська та річки Оскіл [12]. Визволення територій відкрило шлях до їхнього відновлення, але водночас виявило колосальні масштаби руйнувань, завданих війною, зокрема знищені багатоповерхові будинки, школи, мости та спалена військова техніка, мінування території тощо [14, 16]. Повномасштабне вторгнення завдало колосальних збитків економіці та інфраструктурі Харківської області. За даними прокуратури, станом на кінець 2022 року було повністю або частково зруйновано 14,5 тисяч об'єктів, з яких 8701 – житловий фонд (3291 багатоквартирний та 5410 приватних будинків) [5]. Крім того, були зруйновані або пошкоджені 356 закладів культури та 268 закладів охорони здоров'я [5]. Атаки на енергетичну інфраструктуру стали цілеспрямованою стратегією, спрямованою на руйнування цивільних та виробничих потужностей напередодні опалювального сезону [14]. Ці удари не лише спричинили гуманітарні наслідки, а й підірвали економічну діяльність, порушуючи логістичні ланцюги та обмежуючи роботу підприємств. Додаткові свідчення цьому – атаки на ключові комерційні об'єкти, такі як термінал «Нової пошти» та друкарня «Фактор-друк», що призвело до людських жертв та значних матеріальних втрат [3]. Близькість до лінії фронту, постійні обстріли, значні руйнування, знищення інфраструктури, енергетичний дефіцит та пошкодження виробничих потужностей є основними перешкодами для відновлення економіки, повернення бізнесу тощо.

Динаміка релокації підприємств з Харківщини характеризується двома основними фазами. На початку повномасштабного вторгнення спостерігався масовий відтік бізнесу. За словами представника місцевої влади, до 90% підприємств були або зачинені, або релоковані у 2022 році [3, 15]. За даними Opendatabot, за державною програмою релокації область покинуло понад 250 підприємств [4]. Ця ж статистика свідчить, що лише у 2024 році 863 харківські компанії змінили регіон [4]. Найбільша кількість підприємств переїхала до Львівської (21.3%), Закарпатської (13.7%) та Івано-Франківської (12.1%) областей, що ілюструє перерозподіл економічних полюсів. Переміщення бізнесу посилює економічний потенціал західних регіонів, водночас перетворюючи Харківщину з економічного «ядра» на «напівпериферію». Водночас, зафіксовано і зворотний потік: від початку вторгнення на територію Харківської області релокувалося 42 підприємства, тоді як виїхало 39 [4]. Ця суперечність у даних вказує на складність та багатогранність процесу. Дані про 39-42 підприємства, ймовірно, стосуються лише тих, хто скористався офіційною програмою, тоді як загальний відтік був значно більшим. Водночас, місцева влада зазначає, що з 2022 року спостерігається позитивна, хоч і повільна,

динаміка повернення та відкриття підприємств [3, 15]. Це свідчить про перехід від фази шоку, що характеризувалася масовою втечею бізнесу, до фази адаптації, де спостерігається поступове повернення ділової активності та відновлення, попри безпекові ризики.

IT-сектор Харківщини виявився одним із найбільш стійких до викликів війни. Його життєздатність обумовлена тим, що він не залежить від фізичної інфраструктури, а базується на мобільності людського капіталу [16]. За даними Харківського IT-кластера, до 24 лютого в місті працювало понад 50 тисяч фахівців у понад 500 компаніях [1]. На початку вторгнення місто покинуло близько 87% IT-фахівців, однак завдяки можливості віддаленої роботи бізнес-активність не припинилася [1, 15]. Кількість IT-компаній в Харкові навіть зросла: з 510 у 2021 році до 600 у 2023 році [4]. Хоча лише третина фахівців фізично перебуває в місті, інші працюють віддалено, сплачуючи податки до бюджету Харківського регіону [1]. У 2022 році загальний обсяг податкових надходжень від IT-галузі в області становив 2,498 мільярда гривень [1]. У 2023 році частка єдиного податку від IT-сектору становила 50,7% у загальному обсязі сплати єдиного податку міста, що є найбільшим показником серед інших технологічних хабів України [1]. Ці дані підтверджують, що IT-сектор пережив не просто адаптацію, а зміну парадигми, перетворившись на критично важливий «фінансовий донор» для місцевого бюджету. Його стійкість, що базується на децентралізації та мобільності, демонструє, що економіка знань може ефективно функціонувати в умовах прямої військової загрози.

Традиційне машинобудування, яке до війни переживало певні труднощі, зіткнулося з новими викликами. Галузь скорочувала виробництво протягом 2022 року, а основними перешкодами залишалися проблеми з доступом до електроенергії та брак робочої сили. Однак, війна стала каталізатором для переорієнтації частини цього сектору. Оборонно-промисловий комплекс, представлений, зокрема, підприємствами, що виробляють бронетехніку та ракетно-космічні системи, отримав нове життя. Якщо до 2022 року низка заводів мали проблеми з фінансуванням, то в умовах війни їхній потенціал став критично важливим, що демонструє здатність галузі не лише виживати, а й динамічно розвиватися, переорієнтовуючись на потреби військового часу [11, 14, 16]. Так, попри загальне падіння частина традиційної промисловості, відбувся перехід до нового сегменту, що забезпечує їй життєздатність та стратегічне значення.

Вплив війни на агропромисловий комплекс є найбільш довгостроковим та фізично відчутним. За даними дослідження, збитки від втрат ґрунтів та забруднення в Харківській області становлять майже 37 мільярдів гривень [14]. Бойові дії торкнулися 61% території області [16]. Безпосередньо вибухи пошкодили 4,2 тисячі гектарів орних земель, а ще 28,2 тисячі гектарів можуть бути потенційно забруднені [14]. Ключовим стримуючим фактором для відновлення є забруднення території мінами та нерозірваними боєприпасами. Необхідно розмінувати 189,225 тисяч гектарів сільсько-

господарських угідь [13]. Темпи розмінування залишаються повільними: станом на серпень розміновано лише 3842,43 гектара, що вказує на масштабність проблеми та її довготривалий характер [13]. На відміну від IT-сектору, що адаптувався до віддаленої роботи, агропромисловий комплекс критично залежить від фізичного доступу до землі. Таким чином, руйнування в цій галузі є не просто тимчасовими втратами, а загрозою для майбутньої продуктивності та продовольчої безпеки.

Незважаючи на руйнування, Харківська область демонструє економічну стійкість [7], яка не може бути пояснена традиційними довоєнними показниками. В умовах обмеженості статистичних даних, спричиненої воєнним станом, дані про податкові надходження стали ключовим альтернативним індикатором економічної життєздатності. Аналіз податкових надходжень демонструє позицію Харківської області в загальнонаціональному масштабі. За даними, кумулятивні надходження до місцевого бюджету Харківщини станом на 01.08.2025 року склали понад 11,4 млрд грн, що ставить її на третє місце серед регіонів-лідерів після Києва (понад 32 млрд грн) та Дніпропетровської області (понад 13,2 млрд грн) [9]. Щодо надходжень до державного бюджету, Харківська область посідає друге місце, поступаючись лише Києву. Кумулятивні надходження від регіону станом на 01.08.2025 року становлять понад 128,7 млрд грн, тоді як у Києва цей показник перевищує 410 млрд грн [9]. Дніпропетровська область посідає третє місце з показником понад 86,2 млрд грн. [9]. Ці дані підтверджують, що попри військові дії та значні економічні втрати, Харківська область зберігає свій статус як один із ключових фінансових донорів для державного бюджету України, а також має стабільно високий рівень надходжень до місцевих бюджетів.

Порівняння структури податкових надходжень у Харківській області за січень 2023 – липень 2025 демонструє динаміку економічної адаптації регіону в умовах війни. У січні 2023 року загальний обсяг податкових надходжень становив понад 2,57 мільярда гривень. Провідне місце посідала категорія «Державне управління й оборона; обов'язкове соціальне страхування» з обсягом 616,8 млн грн, що становило 24% від загальної суми. На другому місці була «Переробна промисловість», що забезпечила 524,7 млн грн (20,4% від загальних надходжень) [9]. У липні 2023 року загальний обсяг надходжень зріс до майже 2,99 мільярда гривень. Відбулося зміщення акцентів: на перше місце вийшла «Переробна промисловість», внесок якої значно зріс до 844,4 млн грн (28,3% від загального обсягу). Низка промислових підприємств, переважно у місті Харків, продовжують відігравати ключову роль в економіці регіону [10]. На друге місце опустилася категорія «Державне управління й оборона; обов'язкове соціальне страхування» з обсягом 451,6 млн грн (15,1%), хоча її абсолютний внесок трохи зменшився. У січні 2024 року загальний обсяг надходжень становив понад 2,58 мільярда гривень [9, 15]. Структура надходжень продовжила трансформуватися, зокрема «Переробна промисло-

вість» ще більше зміцнила своє лідерство, сплативши 758,0 млн грн, що склало 29,3% від загальної суми. На друге місце вийшла галузь «Оптова та роздрібна торгівля; ремонт автотранспортних засобів і мотоциклів» з обсягом 489,8 млн грн (18,9%), витіснивши з цієї позиції державний сектор. Категорія «Державне управління й оборона; обов'язкове соціальне страхування» опустилася на п'яте місце із внеском у 137,4 млн грн (5,3%). Третю позицію зайняв сектор «Інформація та телекомунікації», сплативши 253,9 млн грн (9,8%) [9]. Станом на липень 2024 року, загальний обсяг податкових надходжень зріс до 2,88 мільярда гривень. В липні 2024 року переробна промисловість зберегла лідерство, сплативши 855,1 млн грн, що становить 29,7% від загальної суми. На другому місці залишилася оптова та роздрібна торгівля з внеском 517,9 млн грн (18%), а на третьому – сфера інформації та телекомунікацій, яка збільшила свій внесок до 287,4 млн грн (10%). Частка державного управління й оборони стабілізувалася на рівні 4,9%. Ці дані підтверджують стійке зростання переробної промисловості та торгівлі, які стали ключовими рушійними силами економіки регіону [9]. У січні 2025 року загальний обсяг податкових надходжень склав 2,95 мільярда гривень 33, що є найвищим показником серед проаналізованих січневих періодів. Структура надходжень продовжує підкреслювати ключові тренди. «Переробна промисловість» зберегла своє домінування з внеском у 928,6 млн грн (31,5%), що є значним зростанням. «Оптова та роздрібна торгівля» також демонструє стабільність, сплативши 588,1 млн грн (19,9%). Третю позицію зберегла галузь «Інформація та телекомунікації» із 257,4 млн грн (8,7%). Варто відзначити, що категорія «Державне управління й оборона» знову зросла, сплативши 167,2 млн грн (5,7%) [9]. Це свідчить про зміцнення позицій переробної промисловості як основного фінансового донора регіону. Станом на липень 2025 року загальний обсяг податкових надходжень досяг нового піку – 3,74 мільярда гривень [9]. «Переробна промисловість» продовжує демонструвати вражаюче зростання, її внесок склав 1,41 мільярда гривень, що становить 37,8% від загальної суми. Це найвища частка за весь аналізований період. «Оптова та роздрібна торгівля» також збільшила свій внесок до 610,2 млн грн (16,3%), зберігаючи друге місце. Сфера «Інформація та телекомунікації» сплатила майже 300 млн грн (8%), що свідчить про її стабільну значущість для економіки. Частка надходжень від «Державного управління й оборони» стабілізувалася на рівні 4,7% [9].

Аналіз податкових надходжень за останні два з половиною роки демонструє чіткі тенденції адаптації та відновлення економіки Харківської області в умовах війни [7]. Незважаючи на постійні загрози, загальні податкові надходження демонструють стабільну позитивну динаміку, що свідчить про адаптацію бізнесу до нових умов. Спостерігається розвиток переробної промисловості, яка згідно з даними, є головною рушійною силою економіки. Її частка в загальних надходженнях зросла з 20,4% у січні 2023 року до майже 38% у липні

2025 року, а сума надходжень збільшилася майже втричі, що може бути пов'язано зі зростанням державних оборонних замовлень. Оптова та роздрібна торгівля постійно посідає одне з провідних місць, що вказує на відновлення внутрішнього попиту та життєдіяльності міста. Сектор інформаційних технологій, попри релокацію частини фахівців, зберігає свою важливість, що підкреслює його стійкість та здатність функціонувати віддалено. На початку 2023 року державне управління й оборона займало перше місце за внеском до бюджету, що, ймовірно, відображало мобілізацію ресурсів у відповідь на вторгнення. Згодом його частка значно знизилася, тоді як переробна промисловість та торгівля почали домінувати, що може свідчити про перехід від економіки, керованої кризовим реагуванням, до ринково-орієнтованої економіки, де головну роль відіграє приватний бізнес.

Стратегічне планування в таких умовах вимагає переходу від моделі «зростання» до моделі «управління кризою» та «відновлення». Програма економічного і соціального розвитку Харківської області на 2025 рік [14] розроблена «виходячи з реальних можливостей бюджету» та наголошує на неможливості «повноцінного підрахунку всіх збитків» до закінчення воєнного стану, що свідчить про реалістичний підхід до планування в умовах високої невизначеності. Програма фокусується на першочергових завданнях: розмінуванні сільськогосподарських земель, відновленні критичної інфраструктури, залученні міжнародної допомоги та стабілізації фінансового стану комунальних підприємств [14].

Висновки. Економіка Харківської області пережила глибоку трансформацію внаслідок повномасштабного

вторгнення. Регіон перестав бути полюсом розвитку в класичному розумінні, як це було до 2022 року. Повномасштабна війна спричинила деградацію регіону, зруйнувавши значну частину його інфраструктурного, промислового та агропромислового потенціалу, що підтверджується даними про зруйновані об'єкти та мільярдними збитками. Зазначена деструкція співіснувала з креативною адаптацією економіки. Традиційна промисловість, що переживала труднощі в мирний час, знайшла нову життєздатність завдяки переорієнтації на оборонно-промисловий комплекс, а гнучкий ІТ-сектор продемонстрував надзвичайну стійкість, зберігши свою активність та фінансову базу, попри відтік фахівців. Тож, завдяки резистентності ключових секторів, зокрема ІТ та оборонно-промислового комплексу, а також фінансовій життєздатності, підтвердженій показниками податкових надходжень, Харківщина утримує достатньо високі позиції серед інших регіонів України. Майбутнє економічне позиціонування Харківщини залежатиме від її здатності перетворити виклики на можливості. Ключовим потенціалом є збережений науково-освітній потенціал, який може стати основою для розвитку інноваційних наукових кластерів. Водночас просторова поляризація в регіоні посилилася, створивши глибокий розрив між відносно стабільним міським центром та прифронтовою периферією. Подальші наукові дослідження будуть спрямовані на встановлення внутрішньо регіональних відмінностей у розвитку, пошуку структурно-динамічних особливостей в розрізі територіальних громад Харківщини, розробку стратегій сталого відновлення та інтеграцію нових методологічних підходів для оцінки розвитку регіонів в умовах невизначеності та постійних змін.

Література:

1. ІТ-галузь в умовах війни: який стан найбільших техноб'єктів України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://itcluster.lviv.ua/it-galuz-v-umovah-vijny-yakuj-stan-najbilshyh-tehhabiv-ukrayiny/> (дата звернення: 17.08.2025 р.)
2. Валовий регіональний продукт / Державна служба статистики України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 15.08.2025 р.)
3. Вижити та відновитися: як харківський бізнес працює на нових місцях після релокації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://allkharkov.com.ua/vyzyty-ta-vidnovytysia-ia-kharkivskiy-biznes-pratsiuie-napovykh-mistsia-kh-pisliya-relokatsii/> (дата звернення: 17.08.2025 р.)
4. Відкриті дані opendatabot [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://opendatabot.ua> (дата звернення: 20.08.2025 р.)
5. Війна у Харківській області у 2022 році [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://suspilne.media/kharkiv/350116-vijna-na-harkivsini-2022-rik-u-cifrah/> (дата звернення: 17.08.2025 р.)
6. Гусева Н., Малярєнко К., Лимар О. Пріоритетні сфери і галузі економіки України: трансформації в умовах війни. *Часопис соціально-економічної географії*. 2024. № 36. С. 75-82. DOI: <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2024-36-07> (дата звернення: 12.08.2025 р.)
7. Малярєнко К. До питання стійкості економічного потенціалу регіону. У кн.: Суспільно-географічні чинники розвитку регіонів : матеріали X Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, Луцьк, 15–16 трав. 2025 р. Луцьк : ФОП Мажула Ю. М., 2025. С. 80-83.
8. Мезенцев К. В., Підгрушній Г. П., Мезенцева Н. І. Регіональний розвиток в Україні: суспільно-просторова нерівність і поляризація : монографія. Київ: ДП «Прінт Сервіс», 2014. 132 с.
9. Податкова карта України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://map.tax.gov.ua/main> (дата звернення: 17.08.2025 р.)
10. Програма економічного і соціального розвитку Харківської області [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/431/43045/files/1%20часть%20%2.pdf> (дата звернення: 20.08.2025 р.)
11. Промисловий потенціал / Підприємництво та споживчий ринок міста Харків [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ppr.kharkiv.ua/ua/industrial-potential> (дата звернення: 17.08.2025 р.)

12. Рік визволення: Харківщина / Український інститут національної пам'яті. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uinp.gov.ua/informaciyni-materialy/vyzvoleni-regiony-materialy-do-richnyci-deokupaciyi/rik-vyzvolennya-harkivshchyna> (дата звернення: 21.08.2025 р.)
13. Розмінування на Харківщині: скільки земель сільськогосподарського призначення треба розмінувати / Слобідський край [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.slk.kh.ua/news/agroprom/rozminuvanna-na-harkivsini-skilki-zemel-silskogospodarskogo-priznacenna-treba-rozminuvati.html> (дата звернення: 17.08.2025 р.)
14. Стратегія розвитку Харківської області на 2021–2027 роки [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1026/102538/files/Стратегія.pdf> (дата звернення: 17.08.2025 р.)
15. Як зростає економіка Харківщини і яких труднощів зазнає через війну / Центр розвитку інновацій [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cid.center/yak-zrostaye-ekonomika-harkivshhyny-i-yakyh-trudnoshhiv-zaznae-cherez-vijnu/> (дата звернення: 20.08.2025 р.)
16. Як повномасштабна війна змінила економіку Харкова / Центр економічної стратегії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ces.org.ua/yak-povnomasshtabna-vijna-zminila-ekonomiku-harkova/> (дата звернення: 17.08.2025 р.)

References:

1. IT-haluz v umovakh viiny: yakyi stan naibilshykh tekhhabiv Ukrainy [The IT industry in times of war: the state of Ukraine's largest tech hubs]. URL: <https://itcluster.lviv.ua/it-galuz-v-umovah-vijny-yakyj-stan-najbilshyh-tehhabiv-ukrayiny/> [in Ukrainian]
2. Valovy rehionalnyi produkt [Gross regional product]. State Statistics Service of Ukraine. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/> [in Ukrainian]
3. Vyzyty ta vidnovytysia: yak kharkivskyi biznes pratsiuie na novykh mistsiakh pislia relokatsii [Survive and recover: how Kharkiv business works in new locations after relocation]. URL: <https://allkharkov.com.ua/vyzyty-ta-vidnovytysia-ia-kharkivskyj-biznes-pratsiuie-na-novykh-mistsiah-pislia-relokatsii/> [in Ukrainian]
4. Vidkryti dani opendatabot [Open data opendatabot]. URL: <https://opendatabot.ua> [in Ukrainian]
5. Viina u Kharkivskii oblasti u 2022 rotsi [War in Kharkiv region in 2022]. Suspilne. Media. URL: <https://suspilne.media/kharkiv/350116-vijna-na-harkivsini-2022-rik-u-cifrah/> [in Ukrainian]
6. Huseva, N., Maliarenko, K., & Lyamar, O. (2024). Priorityetni sfery i haluzi ekonomiky Ukrainy: transformatsii v umovakh viiny [Priority spheres and sectors of Ukraine's economy: transformations in the conditions of war]. *Chasopys sotsialno-ekonomichnoi heohrafii*, 36, 75-82. URL: <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2024-36-07> [in Ukrainian]
7. Maliarenko, K. (2025). Do pytannia stiikosti ekonomichnoho potentsialu rehionu [On the issue of the sustainability of the region's economic potential]. In Yu. M. Barskyi & V. I. Lazhnik (Eds.), *Suspilno-heohrafichni chynnyky rozvytku rehioniv: materialy X Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii* URL: <https://konfgeolutsk.wordpress.com/archives/> [in Ukrainian]
8. Mezentsev, K. V., Pidhrushnyi, H. P., & Mezentseva, N. I. (2014). Rehionalnyi rozvytok v Ukraini: suspilno-prostorova nerivnist i poliaryzatsiia [Regional development in Ukraine: socio-spatial inequality and polarization] (Monograph). DP "Print Servis". URL: https://geokyiv.org/pdf/Reg_development_in_Ukraine.pdf [in Ukrainian]
9. Podatkova karta Ukrainy [Tax map of Ukraine]. Retrieved from <https://map.tax.gov.ua/main> [in Ukrainian]
10. Prohrama ekonomichnoho i sotsialnoho rozvytku Kharkivskoi oblasti [Program of economic and social development of Kharkiv region]. Kharkiv Oblast State Administration. URL: <https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/431/43045/files/1%20часть%20э2.pdf> [in Ukrainian]
11. Promyslovyi potentsial / Pidpryiemnytstvo ta spozhyvchyi rynek mista Kharkiv [Industrial potential / Entrepreneurship and consumer market of Kharkiv city]. URL: <https://ppr.kharkiv.ua/ua/industrial-potential> [in Ukrainian]
12. Rik vyzvolennia: Kharkivshchyna [Year of liberation: Kharkiv region]. Ukrainian Institute of National Memory. URL: <https://uinp.gov.ua/informaciyni-materialy/vyzvoleni-regiony-materialy-do-richnyci-deokupaciyi/rik-vyzvolennya-harkivshchyna> [in Ukrainian]
13. Rozminuvannia na Kharkivshchyni: skilky zemel silskogospodarskoho pryznachennia treba rozminuvaty [Demining in Kharkiv region: how much agricultural land needs to be cleared]. Slobidskyi kraj. URL: <https://www.slk.kh.ua/news/agroprom/rozminuvanna-na-harkivsini-skilki-zemel-silskogospodarskogo-priznacenna-treba-rozminuvati.html> [in Ukrainian]
14. Stratehiia rozvytku Kharkivskoi oblasti na 2021–2027 roky [Strategy for the development of Kharkiv region for 2021-2027]. Kharkiv Oblast State Administration. URL: <https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1026/102538/files/Стратегія.pdf> [in Ukrainian]
15. Yak zrostaie ekonomika Kharkivshchyny i yakykh trudnoshchiv zaznaie cherez viinu [How the economy of Kharkiv region is growing and what difficulties it faces because of the war]. Center for Innovation Development. URL: <https://cid.center/yak-zrostaye-ekonomika-harkivshhyny-i-yakyh-trudnoshhiv-zaznae-cherez-vijnu/> [in Ukrainian]
16. Yak povnomasshtabna viina zminyla ekonomiku Kharkova [How the full-scale war changed Kharkiv's economy]. Center for Economic Strategy. URL: <https://ces.org.ua/yak-povnomasshtabna-vijna-zminila-ekonomiku-harkova/> [in Ukrainian]

Дата першого надходження рукопису до видання: 26.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 29.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025

СТАЛИЙ АКТИВНИЙ ТУРИЗМ В МЕЖАХ СВИДОВЕЦЬКОГО МАСИВУ: ІНФРАСТРУКТУРНІ ЗАХОДИ, БЕЗПЕКОВІ РІШЕННЯ ТА ЕКОЛОГО-ГЕОГРАФІЧНІ ПРІОРИТЕТИ

Романів Павло Володимирович,
кандидат географічних наук, доцент,
доцент кафедри туризму

Львівського національного університету імені Івана Франка
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-4540-0038>
Web of Science Researcher ID : ODL-6771-2025

Соціо-еколого-географічні можливості розвитку активного туризму є ключовим напрямком для переходу від традиційного масового туризму до сталого та відповідального. Цей підхід не лише мінімізує шкоду довкіллю, а й перетворює природні ресурси на основу для унікальних туристичних продуктів. Для досягнення головних завдань використано комплекс взаємодоповнюваних методів: аналіз наукової літератури та нормативних джерел – для теоретичного обґрунтування розвитку активного туризму на засадах сталості; географічний описовий метод – для виявлення природно-рекреаційних ресурсів території, їхнього використання у організації різновидів активного туризму; порівняльний аналіз і систематизація – при розробці пропозицій та класифікації. Використано також метод спостереження.

Стаття присвячена еколого-географічним аспектам розвитку різновидів активного туризму в межах Свидовецького масиву Українських Карпат. Обґрунтовано, що екологічна складова дозволяє розвивати широкий спектр активного туризму, який є менш шкідливим для довкілля, аніж види господарської діяльності, будівництво селитебної та іншої інфраструктури для функціонування гірськолижних курортів тощо. Запропоновано групи форматів активно-туристичних заходів, що є частинами мандрівок, походів, подорожей, експедицій, відповідно до розуміння дефініції активного туризму.

Простежено, що уніфікована модель розвитку форматів активного туризму передбачає такі складові як напрямки, форми реалізації, сезонність, інфраструктурні та організаційні умови, очікувані ефекти.

Запропоновано стратегічні рекомендації, такі як розробка тематичної програми «Свидовець – платформа розвитку активного туризму». Виявлено проблеми забезпечення безпеки туристів. Без створення умов доступу, безпеки, навігації та мінімального сервісу, жодна стратегія популяризації нових видів туризму не буде ефективною як з соціально-економічної, так і з екологічної точок зору. Пропонований пакет заходів базується на принципах сталості, збереження природи та безпеки туристів, що у підсумку дозволить досягнути балансу між рекреаційним використанням і збереженням гірських ландшафтів Карпат.

Ключові слова: Свидовецький масив, активний туризм, гірські території, туристична інфраструктура, безпека туристів.

Romaniv Pavlo. Sustainable active tourism within the Svydovetsky massif: infrastructure measures, security solutions and ecological-geographical priorities

The socio-ecological-geographical possibilities of active tourism development are a key direction for the transition from traditional mass tourism to sustainable and responsible tourism. This approach not only minimizes environmental damage, but also turns natural resources into the basis for unique tourist products. To achieve the main tasks, a set of mutually complementary methods was used: analysis of scientific literature and regulatory sources – for theoretical substantiation of the development of active tourism on the basis of sustainability; geographical descriptive method – for identifying natural and recreational resources of the territory, their use in organizing types of active tourism; comparative analysis and systematization – when developing proposals and classifications. The observation method was also used.

The article is devoted to the ecological and geographical aspects of the development of types of active tourism within the Svydovets massif of the Ukrainian Carpathians. It is substantiated that the ecological component allows developing a wide range of active tourism, which is less harmful to the environment than types of economic activity, construction of residential and other infrastructure for the functioning of ski resorts, etc. Groups of formats of active tourism activities are proposed, which are parts of journeys, hikes, trips, expeditions, in accordance with the understanding of the definition of active tourism.

It was observed that a unified model for the development of active tourism formats provides for such components as directions, forms of implementation, seasonality, infrastructure and organizational conditions, expected effects.

Strategic recommendations are proposed, such as the development of the thematic program «Svydovets – a platform for the development of active tourism». Problems of ensuring the safety of tourists are identified. Without creating conditions for access, safety, navigation and minimum service, no strategy for the popularization of new types of tourism will be effective from both a socio-economic and an environmental point of view. The proposed package of measures is based on the principles of sustainability, nature conservation and tourist safety, which will ultimately allow achieving a balance between recreational use and preservation of the mountain landscapes of the Carpathians.

Key words: Svydovets massif, active tourism, mountainous areas, tourist infrastructure, tourist safety.

Вступ. Активний туризм використовує так звану «екологічну нішу» території як свою основу. Це означає, що туристична діяльність орієнтована на споживання не природних ресурсів, а вражень від унікальних екосистем, ландшафтів та біорізноманіття. Основні можливості виникають зі збереження біорізноманіття, унікальних природних ресурсів та явищ. У цьому контексті важливо запропонувати нові перспективні напрями активного туризму відповідно до ресурсного потенціалу регіону, розробити рекомендації щодо розвитку туристичної інфраструктури та забезпечення безпеки туристів у Свидовецькому масиві Українських Карпат.

Матеріали та методи. У процесі дослідження функціоналу розвитку різновидів активного туризму в межах Свидовця було використано комплекс взаємопов'язаних методів:

- аналіз наукової літератури та нормативних джерел – для теоретичного обґрунтування розвитку активного туризму та його різновидів на засадах сталості;
- географічний описовий метод – для виявлення природно-рекреаційних ресурсів території, їх використання у організації різновидів активного туризму;
- порівняльний аналіз і систематизація – при розробці пропозицій та класифікацій.

Використано також метод спостереження. Проведення спостережень за активними туристичними групами під час різних видів активностей, наприклад, під час походів: гірських, велосипедних подорожей; гірсько-лижних турів тощо. Спостереження проводяться регулярно з 2010 року у зимовий та літній періоди з фіксуванням змін у інфраструктурі, туристичних потоках, екологічній свідомості туристів. Це дозволило отримати інформацію про організацію подорожей, взаємодію учасників груп, ступінь безпеки та інші аспекти активного туризму.

Результати дослідження. Проблематика розвитку активного туризму в гірських районах України

та Європи знаходиться на перетині інтересів науковців, урядів, міжнародних організацій, бізнесу та місцевих громад [6; 7].

Аналіз зведених даних дозволяє стверджувати, що Свидовецький масив має високий ступінь придатності для організації різноманітних форм активного туризму. Найбільш сприятливими є природно-рельєфні та кліматичні чинники, які забезпечують умови для цілорічного використання території: у літній період – пішохідного, велосипедного, екологічного туризму, взимку – лижного, скітурингового, снігоступного. Найвність унікальних природних об'єктів (льодовикові озера, полонини, високогірні хребти) поєднується із збереженим етнокультурним середовищем, що відкриває перспективи розвитку нішевих видів туризму – етно-, агро-, фото- та пригодницького [1; 2]. У таблиці 1 подано характеристику основних різновидів активного туризму в межах Свидівця.

Відтак, пропонуємо розглянути групи форматів активно-туристичних заходів, що є частинами мандрівок, походів, подорожей, експедицій, відповідно до розуміння дефініції активного туризму [3, С. 12].

Екологічно-орієнтовані формати.

Високий природоохоронний потенціал Свидовця, наявність заказників, озер, льодовикових котлів, альпійських лук, рідкісних видів флори та фауни дозволяє створювати маршрути екотуризму, що матимуть мінімальний вплив на довкілля. Це можуть бути:

- пішохідні стежки з QR-кодами та інфошитами (ботанічні, геологічні, ландшафтні маршрути);
- фото-тури (wildlife photography) з фокусом на спостереження за тваринами і птахами;
- маршрути із залученням гідів-біологів, зокрема для студентських груп.

У перспективі доцільно створити екологічний центр з експозицією флори, фауни, геології Свидовця, де туристи могли б отримати короткий інструктаж, огля-

Таблиця 1

Основні види активного туризму в Свидовецькому масиві та їх характеристика [складено автором]

Вид туризму	Сезонність	Поточний рівень розвитку	Основні райони реалізації	Інфраструктурне забезпечення
Пішохідний	Весна–осінь	Високий	Ясіня, Близниця, Апшинець, пол. Драгобрат	Частково марковані маршрути, стоянки (дикі)
Гірськолижний	Зима	Високий (локально)	Драгобрат, Близниця	Траси, підйомники, прокати, готелі
Велосипедний	Літо–осінь	Середній	Усть-Чорна, Лопухово, Кваси	Тимчасові маршрути, без стаціонарної бази
Лижний (туровий)	Зима	Низький	Хребти Стог, Унгарська	Інфраструктура відсутня
Кінний	Весна–осінь	Низький	Приватні садиби в Чорній Тисі, Квасах	Нерозвинена, поодинокі пропозиції
Екотуризм	Літо–осінь	Фрагментарний	Апшинецький заказник, озеро Ворожеська	Відсутня навігація, немає екоцентрів
Трейлранінг / фрірайд	Весна–осінь / зима	Низький	Близниця, Драгобрат	Неорганізований, без інфраструктури
Спелеотуризм	Цілорічно	Дуже низький	Північні схили масиву (поодинокі печери)	Об'єкти не досліджені, відсутнє облаштування
Етнотуризм	Літо–осінь	Локальний	Ясіня, Богдан, Чорна Тиса, Лопухово	Залежить від ініціатив громад, не систематизований

нути виставку, взяти участь в екоосвітніх майстер-класах.

Етнокультурні маршрути.

Свидовець є частиною гуцульського культурного ареалу, тому перспективним є етнотуризм як форма активного пізнавального дозвілля. Йдеться не про пасивне споживання культури, а саме активну участь у традиційних заходах:

- піші або кінні тури з ночівлею у гуцульських хатах;
- участь у майстер-класах з виготовлення сирів, дерев'яного посуду, тканин;
- експедиції на полонини, де проводиться випас худоби;
- гірські мандрівки із супроводом носіїв традицій (спів, легенди, місцевий фольклор);
- реконструкції обрядових свят (напр., Івана Купала, «розпалення ватри» тощо).

Це дає можливість включити громади в туристичний процес без капіталовкладень, через розширення ролі гіда, господаря, екскурсовода тощо.

Екстремальні та сезонні формати.

Для фізично підготовлених туристів доцільно пропонувати екстрим-маршрути, особливо у зимовий і міжсезонний періоди, коли звичайні походи для масового туриста ускладнені. Можливі різновиди:

- снігоступний туризм – як безпечна альтернатива лижним походам;
- скітурінг – сходження зі скітурами на Близницю, Стіг, Унгаряску;
- альпіністські збори на природному рельєфі з використанням природних виступів (зазвичай в теплий період року);
- гірський трейлранінг – організація офіційних трейлових змагань (літо-осінь);
- хайлайнінг – натягування канатів між вершинами (з дотриманням безпеки і лімітувань).

Ці формати приваблюють молодь, ЗМІ, спонсорів та можуть активно просувати регіон у спортивному (активному) туризмі.

Уніфікована модель розвитку форматів активного туризму передбачає напрямки, форми реалізації, сезонність, інфраструктурні та організаційні умови, а також очікувані ефекти (таблиця 2).

Головними стратегічними рекомендаціями вважаємо такі.

1. Розробити тематичну програму «Свидовець – платформа розвитку активного туризму», що міститиме перелік дозволених активностей, маршрутів, екозонування, карти, логістику тощо.

2. Провести інвентаризацію потенційних ділянок для нових маршрутів із GPS-прив'язкою, маркуванням, описом природних і ризик-факторів.

3. Інтегрувати нові види туризму у місцеві громади через навчання гідів, грантові програми для власників садиб, пілотні стартапи.

4. Забезпечити юридичне оформлення маршрутів, особливо у зонах природоохоронного фонду, з погодженням режимів.

5. Запровадити систему добровільної сертифікації маршрутів за критеріями безпеки, природоохоронності та доступності.

6. Залучити донорські та міжнародні проекти, орієнтовані на сталий розвиток гірських регіонів, для фінансування стартових витрат (зокрема – EU4Youth, GIZ, WWF, USAID).

Розширення спектру видів активного туризму, якщо воно буде проводитися раціонально, з опорою на наукове обґрунтування, місцевий досвід та екологічну доцільність, дозволить перетворити Свидовецький масив на багатопрофільний центр цілорічного активного туризму, уникаючи проблему сезонності та зменшуючи ризики надмірної концентрації туристів у обмежених локаціях [4; 5].

Таблиця 2

Перспективні напрями розвитку нових видів активного туризму на Свидовецькому масиві [складено автором]

Напрямок туризму	Форма реалізації	Сезон	Необхідні умови	Очікуваний ефект
Екотуризм	Екомаршрути, стежки, фото-сафари	Весна-осінь	Маркування, біоінфо, гіді, мінімальний вплив	Освіта, виховання, природоохоронна свідомість
Екологічні експедиції	Біоекспедиції, студентські тури та практики	Літо	Бази, інструктори, дозволи	Науковий, освітній ефект
Етно-експедиційний туризм	Піші тури з проживанням у громадах	Літо-осінь	Локальні партнери, кухня, інтеграція з місцевими	Економічна вигода громадам
Снігоступний туризм	Зимові походи зі снігоступами	Зима	Прокат спорядження, інструктори, рятувальне покриття	Зимове завантаження міжсезоння масового туризму
Скітурінг	Сходження зі скітурами	Зима	Маршрути, лавинна безпека, гіді	Професійний туризм, приваблення спортсменів
Хайлайнінг	Міжвершинні троси	Літо	Сертифікація, безпека, фестивалі	PR ефект, видовищність
Гірський трейлранінг	Змагання з трейлрану	Літо-осінь	Маршрути, спонсори, медсупровід	Масові події, туристичний імпульс
Кінний туризм	Маршрути з таборами, інструктори	Весна-осінь	Прокат коней, вказівники, лінії маршрутів	Доступний сімейний та дитячий туризм

Обґрунтування заходів щодо покращення туристичної інфраструктури та забезпечення безпеки туристів у Свидовецькому масиві.

Розвиток активного туризму на території Свидовецького масиву, за умов збереження природного середовища та забезпечення комфорту для туристів, неможливий без якісної туристичної інфраструктури. Йдеться не лише про фізичну доступність території чи базові зручності, але й про створення умов, які гарантують фізичну, інформаційну, екологічну та соціальну безпеку відвідувачів. Наразі туристична інфраструктура Свидовця характеризується нерівномірністю, хаотичним розвитком, відсутністю планування та низьким рівнем інституційної підтримки.

1. Сучасне інфраструктурне поле: проблеми.

Аналіз фактичного стану інфраструктури в межах масиву засвідчує:

- відсутність єдиної концепції просторового планування гірської території;
- незбалансований розвиток – концентрація у 1–2 зонах (Драгобрат, Ясіня), майже повна відсутність інфраструктури у районі північних та південно-західних відрогів;
- відсутність багатофункціональних притулків або стаціонарних баз у високогір'ї;
- дефіцит маркованих маршрутів, картографічної та навігаційної інформації;
- низький рівень системи управління безпекою: рятувальні пункти, аварійний зв'язок, інструктаж, страхування;
- відсутність інтегрованої мережі транспортного доступу (зокрема громадського транспорту та екологічного трансферу);
- недостатнє комунікаційне покриття (мобільна мережа, інтернет), особливо на північних та західних схилах масиву.

Стратегічні принципи розвитку інфраструктури.

Розбудова туристичної інфраструктури на Свидовецькому масиві має ґрунтуватися на таких принципах:

- принцип збереження природного середовища (заборона будівництва в чутливих екоотопах, екологічний аудит усіх об'єктів);
- функціональна зональність – розмежування зон активного рекреаційного використання, буферних ділянок і заповідних територій;
- мережевість – поєднання об'єктів інфраструктури в єдину систему з маршрутами, сервісами, інформуванням;
- цільова орієнтація – створення об'єктів з урахуванням специфіки активного туризму (а не просто «комерційного туризму»);
- сезонна адаптивність – передбачення використання інфраструктури як у літній, так і в зимовий періоди.

3. Пріоритетні заходи інфраструктурного покращення.

На основі аналізу потреб та потенціалу території пропонується комплекс першочергових заходів, згрупованих у функціональні блоки:

I. Покращення фізичної доступності та базової інфраструктури.

1. Ремонт і модернізація гірських під'їзних доріг до основних маршрутів (Ясіня – Драгобрат – Апшинець, Лопухово – полонина Красна).

2. Створення офіційних туристичних стоянок і таборів з біоуалетами, місць для розведення багаття, збиранням сміття.

3. Будівництво кількох стаціонарних високогірних притулків (shelter-type) на маршрутах високої складності (Близнаця, Стіг, хребет Шаса).

II. Розгортання інформаційно-навігаційної інфраструктури

1. Марковані маршрути з QR-кодами, GPS-картами та вказівниками на основі сучасної європейської системи маркування.

2. Встановлення інформаційних панелей у ключових точках доступу: правила поведінки, кодекс туриста, карта місцевості.

3. Розробка і поширення мобільного застосунку «ActiveSvidovets» для туристів із маршрутами, метео, сигналом SOS, списком притулків та сервісів.

III. Безпека та рятувальна підтримка.

1. Організація постійно діючих пунктів гірського порятунку у Ясіні, Драгобраті та сезонних – на полонині Апшинець або Близнаці.

2. Забезпечення мобільного покриття на основних маршрутах шляхом встановлення підсилювачів GSM/Starlink у притулках.

3. Впровадження системи інструктажу та страхування для груп туристів, у тім числі з допомогою місцевих гідів.

IV. Екологічна інфраструктура.

1. Запровадження контейнерних пунктів збору сміття та сезонного вивозу за маршрутом Ясіня – Драгобрат.

2. Створення екологічної станції спостереження на базі Апшинського заказника (моніторинг навантаження, просвітництво).

3. Проведення екологічного зонування Свидовецького масиву для регламентації забудови та допустимого навантаження.

Для оцінки ефективності зазначених заходів доцільно їх узагальнити (таблиця 3). Зазначимо, що пріоритетність оцінена на основі терміновості, потенційного впливу та масштабу охоплення.

4. Інституційні передумови реалізації.

Для впровадження запропонованих заходів необхідно:

- забезпечити міжсекторальну координацію (Держлісагентство, органи ОМС, ДСНС, Нацполіція, ГО та туристичні оператори);
- створити постійну Раду з управління туризмом у Свидовецькому регіоні;
- розробити фінансово-інвестиційну програму, включно з міжнародними проєктами (інструменти регіонального розвитку, EBRD, GIZ, Carpathian Convention);
- ініціювати пілотне впровадження зеленого сертифікату для нової інфраструктури.

**Пропоновані заходи з розвитку інфраструктури та безпеки активного туризму
на Свидовецькому масиві [складено автором]**

№	Захід	Категорія	Очікуваний ефект	Пріоритетність*
1	Ремонт гірських доріг	Фізична інфраструктура	Полегшення доступу, розвантаження маршрутів	Висока
2	Облаштування таборів та стоянок	Комфорт	Легалізація туризму, зменшення шкоди природі	Висока
3	Будівництво високогірних притулків	Безпека, нічліг	Порятунк у негоду, ночівля без шкоди довкіллю	Висока
4	Маркування маршрутів, GPS-навігація	Інформація	Орієнтування, зменшення випадків заблукання	Висока
5	Інформпанелі та стенди	Освіта	Навчання туристів, формування екологічної культури	Середня
6	Мобільний застосунок «ActiveSvidovets»	Цифрові рішення	Цілодобова навігація, підвищення безпеки	Середня
7	Створення пунктів рятунку	Безпека	Зниження смертності/травматизму	Висока
8	Розширення мобільного покриття (Starlink, GSM)	Комунікації	Зв'язок у разі надзвичайних ситуацій	Висока
9	Інструктаж, страхування	Організація	Зменшення відповідальності на організатора	Середня
10	Система сміттєзбирання та сезонного вивозу	Екологія	Зменшення засмічення, естетичне покращення	Висока
11	Еко-станція моніторингу (напр. біля оз. Ворожеська)	Контроль	Оцінка навантаження, моніторинг біорізноманіття	Середня
12	Проведення екологічного зонування	Планування	Регуляція забудови, захист природних ядер	Висока

Розбудова сучасної, екологічно безпечної та функціонально орієнтованої туристичної інфраструктури на Свидовецькому масиві є критичним фактором для подальшого розвитку активного туризму. Без створення умов доступу, безпеки, навігації та мінімального сервісу, жодна стратегія популяризації нових видів туризму не буде ефективною. Пропонований пакет заходів базується на принципах сталості, збереження природи та безпеки туристів, що у підсумку дозволить досягнути балансу між рекреаційним використанням і збереженням гірських ландшафтів Карпат.

Висновки. У ході дослідження встановлено, що ефективна організація активного туризму у межах Свидовецького масиву неможлива без цілеспрямованого покращення інфраструктурної та безпекової складових. Основні проблеми – це відсутність притулків у високогір'ї, нерозвинена система маркування маршрутів,

дефіцит рятувальних служб, слабе мобільне покриття, несанкціоноване сміттєутворення та екологічно шкідливе використання території стихійними туристами.

Запропоновано комплекс заходів, згрупованих у чотири ключові блоки: покращення фізичного доступу, впровадження інформаційно-навігаційної інфраструктури, підвищення рівня безпеки та розгортання екологічних сервісів. Кожен захід оцінено за пріоритетністю та очікуваним ефектом, що дозволяє визначити найбільш доцільні інвестиційні та управлінські кроки.

Таким чином, формування інтегрованої інфраструктури активного туризму має спиратися на принципи екологічної збалансованості, сезонної адаптивності, територіальної рівномірності та функціонального зонування, що забезпечить стійкий розвиток туризму без шкоди для природного середовища.

Література:

1. Активний відпочинок у Карпатах для туристів будь-якого віку. URL: https://www.ukrinform.ua/rubric-other_news/3861357-aktivnij-vidpocinok-u-karpatah-dla-turistiv-budakogo-viku.html
2. Активний відпочинок у Карпатах: чим можна зайнятись. URL: <https://tourinform.org.ua/aktyvnyj-vidpochynok-u-karpatah-chym-mozhna-zajnyatys>
3. Мальська М.П., Гамкало М.З., Романів П.В. Активний туризм: теорія та практика : підручник. Київ : Видавництво «Каравелла», 2022. 252 с.
4. Свидовецький хребет. URL: <https://dokarpat.com.ua/organize/svydoveczkyj-hrebet/>
5. Українські Карпати: Свидовець. URL: <https://www.tourclub.com.ua/uk/info/usefull-info/local-lore-tours/svydovets>
6. Mountain tourism – Towards a more sustainable path (2021). URL: <https://www.e-unwto.org/doi/10.18111/9789284423163>
7. Understanding and Quantifying Mountain Tourism (2023). URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/61b2d458-76be-404e-a47d-ace5a5372b96/content>

References:

1. Aktyvnyi vidpochynok u Karpatakh dla turystiv bud-yakoho viku [Active recreation in the Carpathians for tourists of all ages]. Retrieved from URL: https://www.ukrinform.ua/rubric-other_news/3861357-aktivnij-vidpocinok-u-karpatah-dla-turystiv-budakogo-viku.html [in Ukrainian].
2. Aktyvnyi vidpochynok u Karpatakh: chym mozhna zainiatys [Active recreation in the Carpathians: what to do]. Retrieved from URL: <https://tourinform.org.ua/aktyvnyj-vidpochynok-u-karpatah-chym-mozhna-zajnyatys> [in Ukrainian].
3. Malska M.P., Hamkalo M.Z., Romaniv P.V. (2022), Aktyvnyi turizm: teoriia ta praktyka [Active tourism: theory and practice]. Kyiv: Vydavnytstvo «Karavella». 252 s. [in Ukrainian].
4. Svydovetskyi khrebet [Svydovets Ridge]. Retrieved from URL: <https://dokarpat.com.ua/organize/svydovec-zkyj-hrebet/> [in Ukrainian].
5. Ukrainski Karpaty: Svydovets. [Ukrainian Carpathians: Svydovets]. Retrieved from URL: <https://www.tourclub.com.ua/uk/info/usefull-info/local-lore-tours/svydovets> [in Ukrainian].
6. Mountain tourism – Towards a more sustainable path (2021). Retrieved from URL: <https://www.e-unwto.org/doi/10.18111/9789284423163>.
7. Mountain Tourism (2023). URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/61b2d458-76be-404e-a47d-ae5a5372b96/content> [in English].

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 23.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025

4. НАУКИ ПРО ЗЕМЛЮ

УДК 556.114(477.52)

DOI <https://doi.org/10.32782/naturalspu/2025.2.18>

ГІДРОХІМІЧНИЙ СКЛАД ПОВЕРХНЕВИХ ВОД М. ОХТИРКА

Вакал Юлія Сергіївна,

доктор філософії,

старший викладач кафедри біології людини, хімії та методики навчання хімії

Сумського державного педагогічного університету імені А. С. Макаренка

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8722-7683>

Scopus Author ID: 59504267900

Мацак Станіслав Вячеславович,

викладач кафедри біології людини, хімії та методики навчання хімії

Сумського державного педагогічного університету імені А. С. Макаренка

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5658-0433>

Безбородова Єлизавета Ігорівна,

здобувач вищої освіти спеціальності 014 Середня освіта (Хімія)

Сумського державного педагогічного університету імені А. С. Макаренка

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5658-0433>

У статті розглянуто проблему погіршення стану водних ресурсів під впливом антропогенного чинника, зокрема забруднення неочищеними стічними водами, продуктами сільськогосподарської діяльності (добрива, органічні відходи, пестициди тощо), здійснення надмірної регуляції стоку та розорювання прибережних зон, їх механічне забруднення, що в свою чергу спричиняє деградацію водних об'єктів, зміну гідрологічного режиму та зниження рівня води, а подекуди призводить до пересихання водойм. Розглянуто вплив неорганічних забрудників на життєдіяльність живих організмів та функціонування водних екосистем. Виокремлено сполуки, перевищення вмісту яких найчастіше спостерігається в об'єктах під впливом активної аграрної діяльності людини. Представлено результати комплексного гідрохімічного аналізу водних об'єктів м. Охтирка (р. Охтирка, р. Гусинка, озера Біле, Чикалове та Ігнатенкове). Станом на сьогодні екологічний стан водних об'єктів Охтирщини перебуває у досить критичному стані, перевищення за гідрохімічними показниками зафіксовано майже в усіх досліджених об'єктах (крім р. Гусинка). На нашу думку, основною мірою такий стан досліджених водойм обумовлений антропогенним навантаженням: стоки та викиди з приватних та комунальних господарств, а також діяльність промислових підприємств. За результатами гідрохімічного аналізу нами було встановлено перевищення деяких показників, а саме: нітратів в 4-х із 7-ми зразків у діапазоні 2–6,9 ГДК, йонів амонію у 5-ти з 7-ми пробах в діапазоні 1,1–8,5 ГДК, а також помірні перевищення допустимого вмісту фосфатів, флуоридів, йонів Феруму, хлоридів та сульфатів у деяких пробах. Вважаємо доцільним проведення моніторингу водних об'єктів з метою фіксації змін їх стану, а також запровадження відповідних заходів у разі погіршення ситуації, оскільки від екологічного стану водних об'єктів напряму залежить здоров'я та добробут населення регіону.

Ключові слова: гідрохімічний склад, моніторинг водних об'єктів, поверхневі природні води та озера, хімічне забруднення, водні об'єкти м. Охтирка (річки Охтирка, Гусинка, озера Біле, Чикалове, Ігнатенкове).

Vakal Yuliia, Matsak Stanislav, Bezborodova Yelyzaveta. Hydrochemical composition of surface waters of Okhtyrka city

The article considers the problem of deterioration of water resources under the influence of anthropogenic factors, in particular, pollution by untreated wastewater, agricultural products (fertilizers, organic waste, pesticides, etc.), excessive regulation of runoff and plowing of coastal zones, their mechanical pollution, which in turn causes degradation of water bodies, changes in the hydrological regime and lowering of water levels, and in some places leads to drying up of water bodies. The impact of inorganic pollutants on the vital activity of living organisms and the functioning of aquatic ecosystems is considered. Compounds are identified, the excess content of which is most often observed in objects under the influence of active human agricultural activity. The results of a comprehensive hydrochemical analysis of water bodies in the city of Okhtyrka (Okhtyrka River, Gustinka River, Bile, Chykalove, and Ignatenkove Lakes) are presented. As of today, the ecological state of water bodies in the Okhtyrka region is in a rather critical state, with excess hydrochemical indicators recorded in almost all studied objects (except for the Gustinka River). In our opinion, this state of the studied water bodies is mainly due to anthropogenic load: effluents and emissions from private and communal farms, as well as the activities of industrial enterprises. According to the results of the hydrochemical analysis, we found an excess of some indicators, namely: nitrates in 4 out of 7 samples in the range of 2–6.9 MPC, ammonium ions in 5 out of 7 samples in the range of 1.1–8.5 MPC, as well as moderate excesses of the permissible content of phosphates, fluorides, iron ions, chlorides and sulfates in some samples. We consider it advisable to conduct monitoring of water bodies in order to record changes in their condition, as well as to introduce appropriate measures in case of deterioration of the situation, since the health and well-being of the population of the region directly depend on the ecological condition of water bodies.

Key words: hydrochemical composition, monitoring of water bodies, surface natural waters and lakes, chemical pollution, water bodies of Okhtyrka city (the Okhtyrka and Husynka rivers, the Bile, Chykalove, and Ihnatenkove lakes).

Вступ. Серед пріоритетних екологічних завдань сьогодення важливе місце займає охорона, раціональне та ефективне використання природних ресурсів, передусім водних, зокрема покращення їх екологічного стану та мінімізація впливу на них антропогенних чинників.

Зростання антропогенного впливу, зокрема гідротехнічне будівництво, забруднення стічними водами та сільськогосподарськими хімікатами, спричиняє деградацію водних об'єктів, зміну гідрологічного режиму та зниження рівня води, що подекуди призводить до пересихання водойм [1].

В межах міст з розвинутою промисловістю, які є значними споживачами води та джерелом господарсько-побутових стоків, складається найбільш напружена ситуація, тому що відбувається досить значне та інтенсивне навантаження на водні ресурси [2].

Окрім типових джерел антропогенного навантаження, руйнівний вплив на водні ресурси в Україні чинить війна, зокрема внаслідок знищення чи пошкодження інфраструктури, масового потрапляння у водні ресурси забруднюючих речовин під час вибухів і роботи важкої техніки [3].

Забруднення водних ресурсів різними хімічними сполуками несе вагомі ризики для різних живих організмів та екосистем в цілому. Серед поширених забрудників, що призводять до сильних негативних змін в екосистемах є нафтопродукти, важкі метали, сільськогосподарські добрива, пестициди, промислові відходи тощо. В контексті природних об'єктів, що забруднюються внаслідок активної сільськогосподарської діяльності, доцільно окремо виділити найбільш поширені неорганічні забрудники (нітрати, фосфати тощо), оскільки більшість цих речовин є кінцевим етапом перетворенням різних органічних сполук у доквілі [4]. Водночас вони є ключовими для живлення різних організмів, зокрема рослин, а відтак їх нестача чи надлишок веде до серйозних порушень у функціонуванні екосистем [5; 6].

Нижче більш детально розглянуто деякі неорганічні забрудники, перевищення за якими найчастіше спостерігаються у регіонах з активною сільськогосподарською діяльністю.

Нітроген (азот) у доквілі існує в трьох основних неорганічних формах: йон амонію NH_4^+ (амонійний азот), нітриди NO_2^- (нітритний азот), нітрати NO_3^- (нітратний азот). Водночас варто зазначити, що серед наведених форм нітриди є нестабільними та доволі легко переходять у нітрати або йони амонію в ході окисно-відновних процесів у доквілі.

Нітрати є поширеними забруднювачами як поверхневих, так і підземних вод. Вони можуть легко потрапляти в ґрунтовий розчин та поверхневі води зі стоків сільського господарства, приватних будинків або зі скидами промислової водоочистки, зачасти в концентраціях, що перевищують допустимі межі вмісту NO_3^- у природних об'єктах. Таке забруднення робить відповідно питні джерела води непридатними для використання за призначенням. Також воно спричиняє

активну евтрофікацію поверхневих водойм, оскільки Нітроген належить до біогенних елементів, особливо в теплу пору року, яка в свою чергу спричиняє стрімке скорочення кількостей розчиненого кисню у водоймі, втрату біорізноманіття та порушення екологічного балансу, що може також завдати суттєвої шкоди рибним господарствам та водним об'єктам рекреації.

У випадку ґрунтового розчину надлишок нітратів може призвести до їх надмірного накопичення у рослинах, що може спричинити отруєння організмів, що вживатимуть відповідну рослинну продукцію.

Хронічне отруєння нітратами може виникнути, якщо протягом тривалого часу вживати воду та овочі, забруднені нітратами. Воно проявляється у низці негативних ефектів на організм людини, зокрема метгемоглобінемії, яка веде до зменшення вмісту кисню в крові, а відтак до погіршення самопочуття, запаморочення, втрати свідомості та навіть летальних випадків, у разі потрапляння нітратів в організм у критично високих кількостях. Особливо вразливими до дії нітратів є діти, а також літні люди, які мають захворювання дихальної та серцево-судинної системи. Така дія нітратів основною мірою обумовлена їх частковим перетворенням на нітриди в організмі людини, які власне і спричиняють описані ефекти [5; 7; 8].

Основними джерелами забруднення водойм *йонами амонію* є неочищені побутові стоки приватних домогосподарств, стоки тваринницьких об'єктів та сільськогосподарські стоки з надлишком амонійних добрив.

Амонійний нітроген є важливим елементом для росту рослин, проте його надлишок чинить токсичний вплив на кореневу систему, листя та процеси росту, залежно від виду рослин та їх стійкості.

Підвищені концентрації йону амонію негативно впливають на риб, пригнічуючи зв'язування кисню гемоглобіном, спричиняючи судоми та ураження еритроцитів, ЦНС і зябрового епітелію. Перевищення допустимих норм свідчить про активне забруднення водних об'єктів.

В організмі йони амонію можуть порушити метаболізм, роботу гормонів та кислотно-основний баланс, а також можуть перетворюватись на токсичні азосполуки [9].

Флуор може легко проникати в організми людей і тварин через споживання води, забрудненої його сполуками. В помірних кількостях важливий для захисту кісток та зубів. Водночас його надлишок викликає такі небезпечні для людини захворювання, як флюороз зубів і скелета. Його велика кількість також призводить до зв'язування йонів магнію та кальцію в організмі, що сприяє відкладенню його у нирках, легенях та м'язах. Флуор є стійким компонентом природних вод. Потрапляння Флуору у річки відбувається переважно з ґрунтовими водами, тому в період повені його вміст знижується. Концентрація у річких водах залежить також від зарегульованості річного стоку [8; 9].

Фосфати по-різному впливають на організм. Тому що сам фосфор входить до складу всіх тканин, бере участь у обміні речовин, необхідний для нормальної

роботи серця, мозку, м'язів і нервової системи. Захворювання кісток можуть виникнути через нестачу фосфору в організмі. Надмірне споживання фосфору може призвести до підвищення рівня фосфору в крові, що призведе до виникнення сечокам'яної хвороби тощо. Крім того, фосфати порушують кислотно-лужний баланс захисного шару клітин і можуть викликати захворювання шкіри [10; 11; 12].

Концентрації *хлоридів та сульфатів* у поверхневих водах підлягають помітним сезонним коливанням, що корелюється зі зміною мінералізації води. Загалом певний фоновий вміст даних сполук присутній майже у всіх водоймах, проте їх вкрай великі кількості, особливо в питних водах, можуть становити певну загрозу здоров'ю людини, зокрема шлунково-кишковому тракту.

Важкі метали, що потрапляють із антропогенних джерел забруднення, помітно впливають на водні системи. Це відбивається у підвищенні їх вмісту у воді, донних відкладеннях та біоті, що призводить до зниження продуктивності водних екосистем і до потенційної загрози для людства. Накопичення в організмі людини важких металів, зокрема кадмію, свинцю, міді, заліза може спричинити сильну токсичну дію на організм, зокрема призвести до порушень сну або викликати його відсутність, спровокувати нервові розлади, призвести до онкологічних захворювань [12; 13].

Підсумовуючи, зазначимо, що перевищення переважної більшості гідрохімічних показників (зокрема вмісту неорганічних речовин) призводить до суттєвих порушень у роботі екосистем та ставить під загрозу здоров'я та життя живих організмів, що власне й обумовлює необхідність регулярного моніторингу гідрохімічних показників у природних об'єктах.

Означені вище проблеми не минули і нашого регіону. Проблема забруднення природних вод тісно пов'язана з проблемою забезпеченості прісною водою, тому спостереженню та контролю за рівнем забруднення водних об'єктів має приділятися особлива увага. Зокрема, за результатами попередніх досліджень деяких водних об'єктів Сумської області було неодноразово зафіксовано перевищення вмісту неорганічних забрудників (нітратів, фосфатів, флуоридів, йону амонію тощо) у поверхневих та підземних водах [14; 15].

Згідно з гідрографічним та водогосподарським районуванням, територія Сумської області належить до басейну річки Дніпро. У межах області цей басейн поділяється на два суббасейни: приблизно 53 % території області знаходиться у суббасейні середнього Дніпра (де протікають річки **Псел, Охтирка, Боромля, Ворскла** та розміщені озера, зокрема оз. **Ігнатенкове**), а 47 % – у суббасейні річки Десна [16].

Місто Охтирка, як промисловий та населений центр Сумської області України, має ряд водних об'єктів, стан яких потребує постійного моніторингу та аналізу. Це обумовлено, зокрема, наявністю нафтогазовидобувної промисловості в регіоні та інших великих промислових об'єктів, що створює потенційні ризики забруднення підземних та поверхневих вод різноманітними хіміч-

ними речовинами, що може негативно впливати на якість водних ресурсів.

За даними екологічного паспорту в останні роки збільшився об'єм скидання забруднених зворотних вод у гідрологічні об'єкти м. Охтирка [16].

За результатами останніх досліджень 2024 року було встановлено, що стан р. Охтирка досить критичний – фіксується обміління, зменшення водності річки, перевищення допустимих норм розораності басейну, зміщення окремих природних утворів русла (до 20%) внаслідок діяльності людини, що призводить до підвищення вразливості водойми до антропогенного впливу [17].

Окрім хімічного забруднення, спостерігається фізичне забруднення русла річки. Накопичення твердих побутових відходів, будівельного сміття та рослинних залишків призводить до зменшення проточності, замулення та зміни гідрологічного режиму. Особливо негативний вплив мають гідротехнічні споруди, такі як дамби, які спричиняють застій води та погіршення її якості [18; 19].

Біологічне забруднення проявляється у евтрофікації водойми, що характеризується інтенсивним розвитком водоростей та інших гідрофітів. Це явище зумовлене надмірним надходженням біогенних елементів, таких як азот і фосфор, з сільськогосподарських угідь та комунальних стоків [10].

Водночас кількість комплексних актуальних досліджень гідрохімічного складу водних об'єктів м. Охтирка недостатня, що створює інформаційні прогалини та ускладнює прийняття обґрунтованих рішень щодо охорони та раціонального використання водних ресурсів.

Таким чином, дослідження гідрохімічного складу водних об'єктів м. Охтирка є актуальним, результати якого матимуть значення для забезпечення екологічної безпеки регіону, охорони здоров'я населення та раціонального використання водних ресурсів в умовах сучасних екологічних викликів.

Мета дослідження – комплексний аналіз гідрохімічного складу водних об'єктів міста Охтирка з визначенням якісних та кількісних показників хімічного складу води, оцінкою екологічного стану водних ресурсів та встановленням ступеня їх відповідності санітарно-гігієнічним та екологічним нормативам.

Матеріали та методи. Враховуючи, що результати одержані в ході вимірювань гідрохімічних показників безпосередньо залежать від обраних методик, їх підбір здійснювався враховуючи співвідношення точності, швидкості та оптимальності проведення аналізу. Всі використані методики є стандартними та мають достатню точність, для досягнення поставленої мети [20].

Відбір зразків природної поверхневої води для даного дослідження здійснено з верхнього шару води (до 0,5 м). Після відбору, для збереження складу зразків води, їх було охолоджено до температури 2–4 °С. Аналіз гідрохімічних показників проведено в найкоротші терміни після відбору, пріоритет у визначенні було надано

показникам, що найшвидше зазнають змін (показник рН, вміст нітритів і т.д.) [21].

Для вимірювання гідрохімічних показників у відібраних пробах використано наступні методи:

– Пряма потенціометрія – вміст йонів амонію, флуоридів, хлоридів, нітратів, а також значення рН показника.

– Атомна абсорбція – вміст йонів Купруму.

– Колориметрія – вміст ортофосфатів та нітритів.

– Турбідиметрія – вміст сульфатів.

Результати. Для дослідження було обрано цілу низку водойм на території м. Охтирка та в його околицях. Аналіз гідрохімічних показників було здійснено в зразках води з найбільших водойм даної місцевості для отримання комплексного уявлення про стан поверхневих природних вод у м. Охтирка. Серед обраних для вивчення об'єктів наступні водойми:

– р. Охтирка – притока р. Ворскла, найбільша річка міста, довжина складає близько 28 км (відібрано проби №1–3: штучний ставок на початку річки, на середині річки – в районі центрального парку міста, на кінцевій ділянці річки – на західній околиці міста);

– озеро Ігнатенкове (проба №4) – велика водойма на південно–західній околиці міста, що зазнає суттєвого антропогенного впливу, зокрема через стоки з промислових об'єктів;

– озеро Біле (проба №5) – розміщене в західній частині міста, зазнає впливу від прилеглих домогосподарств;

– озеро Чикалове (проба №6) – знаходиться в центрі міста, щільно оточене приватними домогосподарствами;

– р. Гусинка – притока р. Ворскла, довжина близько 20 км, частково протікає на північній околиці міста (проба №7).

На рисунку 1 подано відповідну картосхему відбору проб.

Дослідження проведене в період другої половини жовтня 2024 року. Під час нього відібрано 7 проб води

з вказаних вище об'єктів для кількісного дослідження значень за низкою гідрохімічних показників: основні неорганічні сполуки Нітрогену (вміст нітратів, нітритів, йонів амонію), вміст флуоридів, ортофосфатів, сульфатів, хлоридів, рН показник, а також вміст йонів Феруму та Купруму. Результати відповідних вимірювань подано нижче в таблиці 1.

З таблиці 1 бачимо, що водневий показник в усіх досліджених зразках перебуває в діапазоні, що відповідає слабколужному середовищу. Щодо основних неорганічних сполук Нітрогену ситуація наступна:

– перевищень допустимого вмісту нітритів в жодній з проб не фіксувалось, вони були виявлені лише в малих кількостях;

– кількість нітратів була перевищена в 4-х із 7-ми зразків, а саме в усіх пробах з р. Охтирка та оз. Ігнатенкове, перевищення в діапазоні 2–6,9 ГДК;

– зафіксовані надмірні кількості йонів амонію у 5-ти з 7-ми пробах в діапазоні 1,1–8,5 ГДК, найвищі значення у оз. Ігнатенкове та оз. Біле.

Проаналізувавши наведені дані, бачимо суттєве забруднення водойм м. Охтирка неорганічними сполуками Нітрогену, попри відсутність нітритів, значний вміст йонів амонію та нітратів у багатьох об'єктах свідчить про довготривале забруднення, що продовжується.

Також в ході аналізу зафіксовано значний вміст хлорид– та сульфат–аніонів у декількох озерах:

– хлориди – в 3-х з 7-ми пробах в межах 1,1–1,3 ГДК (всі досліджені озера);

– сульфати – в 2-х з 7-ми пробах в кількості 1,8 ГДК (озера Чикалове та Біле).

Стосовно інших досліджуваних гідрохімічних показників було зафіксовано помірні перевищення деяких з них у кількох пробах:

– вміст флуоридів – у 2-х з 7-ми пробах (до 1,3 ГДК);

– вміст йонів Феруму – у 2-х з 7-ми пробах (1,3–1,9 ГДК);

– вміст фосфатів – у 1-й з 7-ми проб (до 1,7 ГДК);

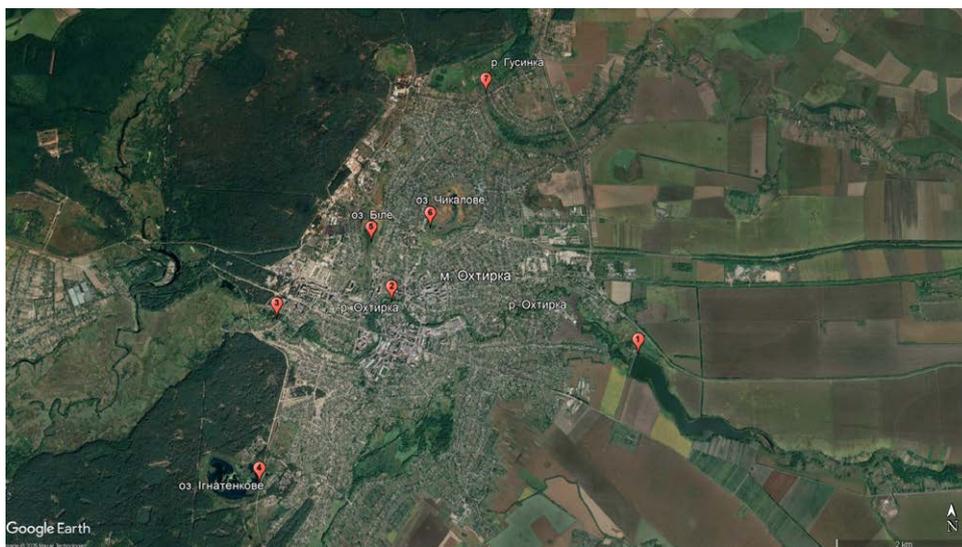


Рис. 1. Картосхема точок відбору зразків води у м. Охтирка

Показники гідрохімічного складу зразків з водою м. Охтирка

Показник	Одиниці виміру	№ Проб							ГДК[18] (мг/л)
		1	2	3	4	5	6	7	
NH_4^+	мг/л	1,43	2,90	3,72	22,15	4,58	8,89	1,49	2,6
Cl^-	мг/л	69,1	108,1	138,0	397,8	431,6	468,2	155,9	350
F^-	мг/л	1,18	1,22	1,04	1,56	0,61	0,59	0,72	1,2
NO_2^-	мг/л	< 0,1	< 0,1	0,11	0,11	< 0,1	< 0,1	0,23	3,3
NO_3^-	мг/л	308,9	97,5	89,2	151,9	43,9	36,7	40,1	45
SO_4^{2-}	мг/л	243,4	324,8	332,2	281,7	890,1	915,1	152,1	500
PO_4^{3-}	мг/л	0,27	1,97	2,04	5,89	0,25	1,28	0,46	3,5
Fe	мг/л	0,13	0,24	0,40	0,56	0,13	0,13	0,10	0,3
Cu	мг/л	0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	1
pH	–	8,40	8,09	7,80	8,14	7,45	7,32	7,24	–

Примітка: помаранчевим кольором в таблиці виділено значення, що становлять 1-2 ГДК, червоним – ті, що перевищують ГДК більш ніж в 2 рази.

– вміст йонів Купруму – не було перевищено в жодній з проб.

Отже, за результатами комплексного гідрохімічного аналізу водних об'єктів м. Охтирка було зафіксовано перевищення низки показників.

Якщо порівняти одержані нами результати, з даними попередніх досліджень гідрохімічного складу поверхневих вод на території м. Охтирка, зокрема р. Охтирка, спостерігаємо суттєве погіршення екологічної ситуації. Найвне помірно зростання вмісту у воді хімічних речовин, що значно впливають на рівень мінералізації водою (сульфати, хлориди), а також значні перевищення ГДК за вмістом у воді деяких неорганічних форм Нітрогену (йони амонію, нітрат-йони) [22; 23].

Означена негативна динаміка змін гідрохімічного складу поверхневих вод даного регіону зумовлює необхідність проведення подальших досліджень з метою контролю та запобіганню подальшому погіршенню екологічної ситуації.

Висновки. В ході вивчення гідрохімічного складу поверхневих природних вод м. Охтирка, ми дійшли

висновку, що майже всі досліджені об'єкти (р.Охтирка, озера Біле, Чикалове та Ігнатенкове) знаходяться в незадовільному стані за їх гідрохімічними показниками. На нашу думку, основною мірою такий стан досліджених водою обумовлений антропогенним навантаженням: стоки та викиди з приватних та комунальних господарств, а також діяльність промислових підприємств. Антропогенний характер забруднення водою підтверджується показниками одержаними при дослідженні води з р. Гусинка (перевищень за жодним з вимірюваних показників не виявлено), ця річка знаходиться на околицях міста та віддалена від щільної забудови і промислових об'єктів, а відтак зазнає меншого впливу від людської діяльності. Вважаємо доцільним моніторинг даних водою у майбутньому з метою фіксації змін в їх екологічному стані, а також запровадження відповідних заходів у разі погіршення ситуації. Ці об'єкти є одними з ключових водних ресурсів даного регіону. Відповідно від їх стану напругу залежить здоров'я та добробут населення.

Література:

1. Державна екологічна інспекція в Сумській області. URL: <https://deisumy.gov.ua/> (дата звернення: 22.05.2025)
2. Xu Z., et al. Urban river pollution control in developing countries. *Nature Sustainability*. 2019. Vol. 2, No. 3. P. 158–160.
3. Строкаль В.П., Ковпак А.В. Воєнні конфлікти та вода: наслідки й ризику. *Екологічні науки*. 2022. № 5. С. 94–102.
4. Мацак С.В., Вакал Ю.С. Вплив сільськогосподарської діяльності на стан водних ресурсів. Матеріали VI Всеукраїнської студентської наукової конференції «Експериментальні та теоретичні дослідження в контексті сучасної науки», м. Рівне, 21 червня 2024 р. Рівне, 2024. С.154–155.
5. Walker D.B., et al. Surface water pollution. *Environmental and Pollution Science*. Academic Press, 2019. P. 261–292.
6. Шестопапов О.В. та ін. Аналіз показників якості води: сучасні аспекти і виклики. *Екологічні науки*. 2024. № 3 (54). С. 76–82.
7. Vardhan K.H., Kumar P.S., Panda R.C. A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. *Journal of Molecular Liquids*. 2019. Vol. 290. Article ID: 111197.
8. Craswell E. Fertilizers and nitrate pollution of surface and ground water: an increasingly pervasive global problem. *SN Applied Sciences*. 2021. Vol. 3, No. 4. Article ID: 518.
9. Boschiero B. N., Mariano E., Azevedo R. A., Trivelin P. C. O. Influence of nitrate–ammonium ratio on the growth, nutrition, and metabolism of sugarcane. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2019. 139. P. 246–255.
10. Wan K., Huang L., Yan J., Ma B., Huang X., Luo Z., Xiao T. Removal of fluoride from industrial wastewater by using different adsorbents: A review. *Science of the Total Environment*. 2021. 773. P. 145535.
11. Wang M., Li X., He W. Y., Li J. X., Zhu Y. Y., Liao Y. L., Yang X. E. Distribution, health risk assessment, and anthropogenic sources of fluoride in farmland soils in phosphate industrial area, southwest China. *Environmental Pollution*. 2019. 249. P. 423–433.

12. Василенко, Л., Березницька, Ю., Кравченко, М., Шевченко, О., Цьома, Т. Забруднення поверхневих вод фосфатами та важкими металами. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, (38), 2022. С. 4–17. URL: <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2022.38.4-17> (дата звернення: 22.05.2025)
13. Кобилянський В.Я., Сорокіна К.Б., Кравченко О.В. Характеристика потенційних хімічних, біологічних, радіаційних та ядерних забруднень води в умовах воєнного стану. *Науковий вісник будівництва*. 2024. № 110. С. 53–61.
14. Вакал Ю.С., Мацак С.В., Гідрохімічний склад природних джерел м. Суми та с. Степанівка. *Слобожанський науковий вісник. Серія: Природничі науки*. 2024. Вип. 2. С. 92–97.
15. Касьяненко Г.Я., Мацак С.В. Техногенні флуоропохідні в природних об'єктах м. Суми. Зб. мат. Всеукр. наук. конф. «Шості Сумські наукові географічні читання» Суми, 2021. С. 121–124. URL: chitannya_2021_cc0dd.pdf (sspu.edu.ua). (дата звернення: 22.05.2025)
16. Екологічний паспорт Сумської області за 2023 рік. URL: <https://mepg.gov.ua/diyalnist/napryamku/ekologichnyj-monitoring/ekologichni-pasporty/> (дата звернення: 22.05.2025)
17. Данильченко О.С. Оцінка екологічного стану малої річки Охтирка. Матеріали XI Міжнародної наукової конференції «Актуальні проблеми дослідження довкілля», м. Суми, 22–23 травня 2025 р. Суми 2025. С. 18–22
18. Забруднення водних об'єктів на Сумщині з початку року. URL: <https://sumy.dei.gov.ua/post/481> (дата звернення: 22.05.2025)
19. Головатюк Л.М., Бондар О.Б., Кратко О.В. Небезпека та наслідки забруднення водою для організму людини. Біологічна безпека: Науково-практичний журнал. *Екологічні науки*. 2023. № 5. С. 50.
20. Гігієнічні нормативи якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення. *Наказ МОЗ України № 721 від 02 травня 2022 року*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text> (ата звернення: 22.05.2025)
21. Відомчі нормативні документи. Інструкція з відбирання, підготовки проб води і ґрунту для хімічного та гідробіологічного аналізу гідрометеорологічними станціями і постами. Київ, 2016. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0030388-16#Text> (дата звернення: 22.05.2025)
22. Данильченко О.С. Мінералізація та вміст головних іонів у воді малих річок різних фізико-географічних провінцій Сумського Придніпров'я. *Наукові записки Сумського державного педагогічного університету ім. А.С.Макаренка. Географічні науки*. 2012. Вип. 3. С. 96-103.
23. Батура В.В., Касьяненко Г.Я. Роль р. Охтирка у формуванні хімічного складу поверхневих природних вод р. Ворскла. *Природничі науки*. 2012. Вип. 9. С. 197-201.

References:

1. Derzhavna ekolohichna inspektsiia v Sumskii oblasti [State Environmental Inspectorate in Sumy region]. [in Ukrainian]
2. Xu, Z., Xu, J., Yin, H., Jin, W., Li, H., & He, Z. (2019). Urban river pollution control in developing countries. *Nature Sustainability*, 2(3), 158–160. [in English].
3. Stokal, V. P., & Ковпак, А. В. (2022). Voienni konflikty ta voda: naslidky i ryzyky. [Military conflicts and water: consequences and risks *Environmental sciences*]. *Ekolohichni nauky*, (5), 44. [in Ukrainian].
4. Matsak, S. V., & Vakal, Y. S. (2024). Vplyv silskohospodarskoi diialnosti na stan vodnykh resursiv. [Impact of agricultural activities on water resources]. *In Proceedings of the 6th All-Ukrainian Student Scientific Conference "Experimental and Theoretical Research in the Context of Modern Science"*, Rivne, June 21, 2024 (pp. 154–155). [in Ukrainian].
5. Walker, D. B., Baumgartner, D. J., Gerba, C. P., & Fitzsimmons, K. (2019). Surface water pollution. In *Environmental and pollution science* (pp. 261–292). Academic Press. [in English].
6. Shestopalov, O. V., Sakun, A. O., Lizantan, P. S., Kanunnikova, N. O., Haiduchek, O. H., Tomashevskiy, R. S., & Vorobiov, B. V. (2024). Analiz pokaznykiv yakosti vody: suchasni aspekty i vyklyky. [Analysis of water quality indicators: modern aspects and challenges. *Environmental sciences*]. *Ekolohichni nauky*, 3(54), 76–82. [in Ukrainian].
7. Vardhan, K. H., Kumar, P. S., & Panda, R. C. (2019). A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. *Journal of Molecular Liquids*, 290, 111197. [in English].
8. Craswell, E. (2021). Fertilizers and nitrate pollution of surface and ground water: an increasingly pervasive global problem. *SN Applied Sciences*, 3(4), 518. [in English].
9. Boschiero, B. N., Mariano, E., Azevedo, R. A., & Trivelin, P. C. O. (2019). Influence of nitrate–ammonium ratio on the growth, nutrition, and metabolism of sugarcane. *Plant Physiology and Biochemistry*, 139, 246–255. [in English].
10. Wan, K., Huang, L., Yan, J., Ma, B., Huang, X., Luo, Z., ... & Xiao, T. (2021). Removal of fluoride from industrial wastewater by using different adsorbents: A review. *Science of the Total Environment*, 773, 145535. [in English].
11. Wang, M., Li, X., He, W. Y., Li, J. X., Zhu, Y. Y., Liao, Y. L., ... & Yang, X. E. (2019). Distribution, health risk assessment, and anthropogenic sources of fluoride in farmland soils in phosphate industrial area, southwest China. *Environmental Pollution*, 249, 423–433. [in English].
12. Vasylenko, L. O., Berezhnyska, Yu. O., & Kravchenko, M. V. (2022). Zabrudnennia poverkhnevyykh vod fosfatamy ta vazhkyu metalamy. [Surface water pollution by phosphates and heavy metals]. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliki*, (38), 4–17. [in Ukrainian].
13. Kobylansky, V. Ya., Sorokina, K. B., & Kravchenko, O. V. (2024). Kharakterystyka potentsiinykh khimichnykh, biolohichnykh, radiatsiinykh ta yadernykh zabrudnen vody v umovakh voiennoho stanu. [Characteristics of potential chemical, biological, radiation and nuclear water contamination under martial law. *Scientific Bulletin of Construction*]. *Naukovyi visnyk budivnytstva*, (110), 53–61. [in Ukrainian].

14. Vakal, Yu. S., & Matsak, S. V. (2024). Hidrokhimichniy sklad pryrodnykh dzherel m. Sumy ta s. Stepanivka. [Hydrochemical composition of natural springs in the city of Sumy and the village of Stepanivka]. *Slobozhanskyi Scientific Bulletin. Series: Natural Sciences*, (2), 92–97. [in Ukrainian].
15. Kasyanenko, H. Ya., & Matsak, S. V. (2021). Tekhnohenni fluoropokhidni v pryrodnykh ob'ekтах m. Sumy. [Technogenic fluorine derivatives in natural objects of Sumy]. *Sixth Sumy Scientific Geographical Readings: Collection of Materials*, 121. [in Ukrainian].
16. Ekolohichniy pasport Sumskoi oblasti za 2023 rik. [Ecological passport of Sumy region for 2023]. [in Ukrainian]
17. Danilchenko, O. S. (2025). Otsinka ekolohichnoho stanu maloi richky Okhtyrka [Assessment of the ecological state of the small river Okhtyrka]. *Materials of the 11th International Scientific Conference "Actual Problems of Environmental Research" (Sumy, May 22–23, 2025)* (pp. 18–22). Sumy.
18. Zabrudnennia vodnykh ob'ektiv na Sumshchyni z pochatku roku [Pollution of water bodies in Sumy region since the beginning of the year]. [in Ukrainian].
19. Holovatyuk, L. M., Bondar, O. B., & Kratko, O. V. (2023). Danger and consequences of water pollution for the human body. *Biological safety: Scientific and practical journal, ecological sciences*, (5), 50. [in Ukrainian].
20. Ministerstvo okhorony zdorovia Ukrainy. (2022, May 2). Hihienichni normatyvy yakosti vody vodnykh ob'ektiv dlia zadovolenia pytnykh, hospodarsko-pobutovykh ta inshykh potreb naselennia. [Hygienic standards for water quality of water bodies to meet drinking, household and other needs of the population]. Ministry of Health of Ukraine. (2022, May 2). (Nakaz No. 721). [in Ukrainian]
21. Vidomchi normatyvni dokumenty. Instruktsiia z vidbyrannia, pidhotovky prob vody i gruntu dlia khimichnoho ta hidrobiolohichnoho analizu hidrometeorolohichnykh stantsiiamy i postamy. [Departmental regulatory documents. Instructions for the collection and preparation of water and soil samples for chemical and hydrobiological analysis by hydrometeorological stations and posts]. (2016). Kyiv. [in Ukrainian]
22. Danylchenko O.S. (2012). Mineralizatsiia ta vmist holovnykh ioniv u vodi malykh richok riznykh fizyko-geohrafichnykh provintsii Sumskoho Prydniprovia. [The mineralization and the main ions in the water of small rivers of physiographic provinces of Sumy Prydniprovia]. *Naukovi zapysky Sumskoho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu im. A.S. Makarenka. Geohrafichni nauky*, 3, 96-103. [in Ukrainian]
23. Batura V.V., Kasyanenko G.Ya. (2012). Rol r. Okhtyrka u formuvanni khimichnoho skladu poverkhnevyykh pryrodnykh vod r. Vorskla. [Okhtyrka river role in shaping the chemical composition of superficial natural waters Vorskla river]. *Pryrodnychi nauky*. 2012, 9, 197-201. [in Ukrainian]

Дата першого надходження рукопису до видання: 20.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 23.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025

ІЛЬМЕНІТ З НИЖНЬОКРЕЙДОВИХ КОНТИНЕНТАЛЬНИХ ВІДКЛАДІВ АНДРІЙВСЬКОГО РОЗСИПНОГО РОДОВИЩА ТИТАНОВИХ РУД

Ковальчук Мирон Степанович,

доктор геологічних наук, професор,

завідувач відділу літології

Інституту геологічних наук НАН України

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9265-9707>

Scopus Author ID: 56358899000

Крошко Юлія Володимирівна,

кандидат геологічних наук,

старший науковий співробітник,

Інституту геологічних наук НАН України

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7601-7760>

Scopus Author ID: 57224881975

Подано коротку характеристику рудоносності Андріївського розсипного родовища титанових руд, яке розміщене в межах Корсунь-Новомиргородського плутону Інгульського мегаблоку Українського щита. Продуктивними відкладами родовища є апт-нижньоальбські алювіально-делювіальні утворення, які представлені піщаними каоліністими відкладами та перевідкладеними каолінами, частково четвертинний алювій (в північній частині) і, іноді, узбережно-морські піски верхнього альбу. Нижньокрейдові континентальні відклади вивірюють тектонічно-ерозійні палеодолини в корі вивірювання кристалічних порід фундаменту. За даними хімічного аналізу ільменіту досліджено латеральний розподіл цього мінералу з різним вмістом оксидів (TiO_2 , FeO , Fe_2O_3 , $\text{FeO/Fe}_2\text{O}_3$, V_2O_5 , P_2O_5 , Cr_2O_3) у нижньокрейдових континентальних відкладах Андріївського родовища. З'ясовано, що хімічний склад і просторовий розподіл середнього вмісту ільменіту з різним вмістом оксидів обумовлений особливостями мінералоутворення в кристалічних породах фундаменту, гіпергенними перетвореннями мінералу в різних зонах кори вивірювання та трансформацією мінералу при седиментогенезі і діагенезі осадів. На основі аналізу результатів хімічного аналізу ільменіту виявлено, що ступінь змінності ільменіту Андріївського родовища є незначний. Слід зазначити, що ступінь змінності ільменіту в піщаних відкладах децю більший, аніж у перевідкладених каолінах. Це обумовлено більш інтенсивною і тривалою трансформацією ільменіту в піщаних утвореннях у порівнянні з перевідкладеними каолінами. Загалом у нижньокрейдових відкладах вміст TiO_2 в ільменіті – 44,71–56,21 %; вміст Cr_2O_3 – 0,017–0,027; відношення $\text{FeO/Fe}_2\text{O}_3$ – 1,11–4,15. Це свідчить про те, що ільменіт у нижньокрейдових відкладах слабо змінений і має високу якість. Досліджено напрям і силу кореляційних зв'язків між оксидами в ільменіті. З'ясовано, що в ільменіті з піщаних відкладів і перевідкладених каолінів наявний обернений сильний кореляційний зв'язок між вмістом FeO і Fe_2O_3 ; P_2O_5 і V_2O_5 .

Ключові слова: Андріївське родовище, геологічна будова, рудоносність, нижньокрейдові континентальні відклади, ільменіт, хімічний склад, ступінь змінності, кореляційні зв'язки.

Kovalchuk Myron, Kroshko Yuliia. Ilmenite from the lower cretaceous continental deposits of the Andriyivsky placer deposit of titanium ores

A brief description of the ore-bearing capacity of the Andriyivsky placer deposit of titanium ores, which is located within the Korsun-Novomyrhorod pluton of the Ingul megablock of the Ukrainian Shield, is given. The productive deposits of the Andriyivsky deposit are Aptian-Lower Albian alluvial-deluvial formations, which are represented by kaolinite sandy and redeposited kaolins, partly Quaternary alluvial sands (in the northern part) and, sometimes, coastal-marine sands of the Upper Albian. Lower Cretaceous continental deposits lie in a tectonic-erosional paleovalley in the weathering crust of crystalline basement rocks. According to the chemical analysis of ilmenite, the lateral distribution of this mineral with different oxide contents (TiO_2 , FeO , Fe_2O_3 , $\text{FeO/Fe}_2\text{O}_3$, V_2O_5 , P_2O_5 , Cr_2O_3) in the Lower Cretaceous continental deposits of the Andriyivsky deposit was investigated. It has been established that the chemical composition and spatial distribution of the average content of ilmenite with different oxide contents is determined by the peculiarities of mineral formation in crystalline rocks of the basement, hypergenic transformations of the mineral in different zones of the weathering crust, and the transformation of the mineral during sedimentogenesis and diagenesis of sediments. Based on the analysis of the results of chemical analysis of ilmenite, it was found that the degree of alteration of ilmenite in the Andriyivsky deposit is insignificant. It should be noted that the degree of alteration of ilmenite in sand deposits is slightly higher than in redeposited kaolins. This is due to the more intense and prolonged transformation of ilmenite in sand formations compared to redeposited kaolins. In general, in Lower Cretaceous deposits, the TiO_2 content in ilmenite is 44.71–56.21%; the Cr_2O_3 content is 0.017–0.027; the $\text{FeO/Fe}_2\text{O}_3$ ratio is 1.11–4.15. This indicates that ilmenite in Lower Cretaceous deposits is slightly altered and of high quality. The direction and strength of correlation relationships between oxides in ilmenite were investigated. It was found that in ilmenite from sand deposits and redeposited kaolins, there is a strong inverse correlation between the content of FeO and Fe_2O_3 ; P_2O_5 and V_2O_5 .

Key words: Andriyivsky deposit, geological structure, ore bearing capacity, Lower Cretaceous continental deposits, ilmenite, chemical composition, degree of alteration, correlations.

Вступ. Титан належить до стратегічної мінеральної сировини і є основою економічного зростання та обороноздатності держави [1]. Україна володіє значними запасами титанових руд, які зосереджені в кристалічних породах фундаменту, корі вивітрювання і різновікових і різногенетичних розсипах [1, 2]. Значні запаси титанових руд пов'язані з габро-анортозитовою формацією кристалічних порід фундаменту [2, 3, 5]. Габро-анортозитова формація Українського щита, зокрема в межах Корсунь-Новомиргородського плутону, містить родовища і рудопрояви фосфатно-титанових руд (апатит-ільменітових, апатит-титаномagnetит-ільменітових та ільменітових) [3, 5]. На сьогоднішній день розробляються лише розсипні родовища. Кора вивітрювання у разі включення її до продуктивних відкладів, розробляється частково супутньо з континентальними розсипами. Застосування титану в різних галузях промисловості визначається його якісними характеристиками, які є похідною хімічного складу головного носія титану – ільменіту. Ільменіт в кристалічних породах фундаменту, як правило високої якості і майже не змінений. Трансформація хімічного складу ільменіту починається в екзогенних умовах внаслідок чого мінерал зазнає змін і втрачає якісні показники. Дослідження залежності якості пігментного двоокису титану від речовинного складу ільменіту проводилося на відомих родовищах Коростенського і Корсунь-Новомиргородського плутонів на початку 80-х років минулого століття і продовжується авторами публікації з використанням ПС-технологій [4, 5]. Такі дослідження є важливими, оскільки дозволяють з'ясувати просторове поширення ільменіту з різним вмістом оксидів та різного ступеню змінності в досліджуваній формаційній одиниці та прогнозувати якісні характеристики мінералу площ денудації. Саме висвітленню результатів дослідження ільменіту з континентальних утворень апту-нижнього альбу Андріївського розсипного родовища титанових руд присвячена ця стаття.

Матеріали та методи дослідження. Методико-методологічною основою дослідження стали наукові напрацювання авторів зі структурно-літологічного моделювання різновікових і різногенетичних розсипів титано-цирконієвих мінералів Корсунь-Новомиргородського та Коростенського плутонів та мінералогії розсипних мінералів. Методико-методологічною основою дослідження стали напрацювання авторів щодо рудоносності Андріївського родовища [6–8] та латерального поширення ільменіту з різним вмістом оксидів у межах Тростяницького [4], Аврамівського і Західного [8] родовищ титанових руд. Для проведення досліджень використано фактичні дані, які містяться у звітах виробничих організацій. На основі узагальнення, аналізу й інтерпретації матеріалів виробничих звітів була створена цільова атрибутивна база даних, яка містить координати, опис, результати опробування свердловин та хімічного аналізу ільменіту. Картографічні та графічні побудови проведено в програмному забезпеченні Golden Software Strater, Golden Software Surfer, які дали можливість дослідити особливості просторового поши-

рення ільменіту з різним вмістом оксидів та різним ступенем змінності.

Мета статті – представити результати дослідження латерального поширення ільменіту різного ступеня змінності та з різним вмістом оксидів у континентальних відкладах апту-нижнього альбу Андріївського родовища.

Аналіз попередніх досліджень. У межах південно-західної частини Новомиргородського масиву Корсунь-Новомиргородського плутону геологи-виробничники виокремили низку перспективних ділянок серед яких – Андріївська [3]. Рудоносність цієї ділянки зумовлена рудоносністю кристалічних порід фундаменту і локалізована в корі вивітрювання, нижньокрейдових континентальних, узбережно-морських та четвертинних алювіальних відкладах [8]. Зокрема, Південно-Українська геологічна експедиція під керівництвом М.С. Федоренко у 1969–1970 рр. здійснила загальні пошуки ільменітових розсипів у відкладах нижньої крейди в межах Лебедино-Балаклійської палеодолини [8]. У результаті пошукових робіт була виявлена Андріївська ділянка розсипів четвертинного віку. У 1971–1973 рр. роботами Південно-Української геологічної експедиції під керівництвом В.І. Скоробач у межах Андріївської ділянки виокремлено поля для постановки пошуково-оціночних робіт [8]. Протягом 1974–1976 рр. Південно-Українська геологічна експедиція здійснила під керівництвом В.І. Скоробач, В.Г. Кармазенко пошуково-оціночні роботи на Андріївській ділянці [8]. У результаті пошукових робіт частково досліджено речовинний склад і збагачуваність руд Андріївського розсипу. 2016 року Ю.В. Крошко дослідила ільменітоносність кори вивітрювання і продуктів її розмиву та перевідкладення в межах верхньої палеотечії Лебедин-Балаклійської палеодолини, побудувала цифрові структурно-літологічні моделі апт-нижньоальбських і середньооценових континентальних розсипів ільменіту в межах Корсунь-Новомиргородського плутону, зокрема й Андріївського розсипу [6–7]. У 2023 р. Ю.В. Крошко і М.С. Ковальчук дослідили структурні і речовинні особливості низки родовищ титанових руд у корі вивітрювання і крейда-четвертинних відкладах Новомиргородського і Канізького масивів, зокрема й Андріївського родовища [8].

Результати дослідження. Андріївське розсипне родовище титанових руд розташоване у межах долини річки Велика Вись та її схилів на території Новомиргородського району Кіровоградської області (між населеними пунктами Іванівка, Троянів, Андріївка, Лікарів) [8]. У геологічній будові ділянки беруть участь (знизу вгору): кристалічні породи фундаменту (граніти рапаківі, лабрадорити, монцоніти), їхня кора вивітрювання, континентальні та узбережно-морські відклади нижньої крейди, відклади палеогенової, неогенової систем, четвертинні алювіальні відклади долини річки Велика Вись. Основними титановмісними породами є лабрадорити, які поширені в південній частині родовища. Тут також наявне невеликого розміру тіло монцонітів. На півночі родовища кристалічні породи представлені

рапаківідоподібними гранітами, серед яких лабрадорити й монцоніти утворюють невеликі ізольовані ділянки.

На породах кристалічного фундаменту залягає їхня кора вивітрювання. У межах родовища товщина кори вивітрювання 0,2–32,0 м; на породах основного складу – до 20 м [8]. На більшій частині родовища присутня кора вивітрювання кислих порід, яка практично є безрудною. Кора вивітрювання складається з трьох зон, серед яких верхня – каолінітова значно розмита (товщина цієї зони до 4,0 м). Середній вміст мінералів у корі вивітрювання родовища, кг/м³: ільменіту 15,95–61,5; циркону 0,03–3,11 (середнє 0,52); рутилу 0,01–0,1 (середнє 0,03) [8]. Ореоли поширення підвищеного вмісту мінералів просторово не збігаються.

Продуктивна товща Андріївського розсипу представлена в основному алювіально-делювіальними відкладами апту-нижнього альбу, частково четвертинним алювієм і, в окремих випадках, – узбережно-морськими відкладами верхнього альбу. Основний рудоносний потенціал зосереджено в нижньокрейдових континентальних утвореннях, які виповнюють давні тектонічно-ерозійні палеодолини в корі вивітрювання кристалічних порід фундаменту. Для континентальних відкладів апту-нижнього альбу кора вивітрювання була постачальником теригенного матеріалу і плитиком.

Континентальні відклади нижньої крейди поширені на перетині долини річки Велика Вись і Лебедин-Балаклійської палеодепресії, до якої вони приурочені. На окремих ділянках нижньокрейдові відклади розмиті внаслідок формування сучасної долини річки Велика Вись. Континентальні відклади представлені світло-сірими пісками кварцовими каоліністими і каолінами перевідкладеними.

Товщина перевідкладених каолінів 0,6–23,6 м (в середньому 4,85 м) [8]. Середній вміст мінералів, кг/м³: ільменіту 4,0–165,4 (середнє 46,65), циркону 0,05–2,5 (середнє 1,47), рутилу 0,01–1,5 (середнє 0,07) [8]. Прямий помірний кореляційний зв'язок існує між середнім

вмістом ільменіту і циркону (+0,30) та середнім вмістом циркону і рутилу (+0,48); прямий слабкий – між середнім вмістом ільменіту і рутилу (+0,24) [8].

Товщина апт-нижньоальбських пісків 1,2–23,8 м (середнє 8,41 м) [8]. Переважаючий розмір зерен піщаних відкладів 0,3 мм, а важких мінералів – 0,12–0,8 мм. Середній вміст розсипних мінералів, кг/м³: ільменіту 2,85–83,58 (середнє значення 22,57 м), циркону 0,03–11,96 (середнє 0,47), рутилу 0,01–4,8 (середнє 0,14) [8].

Максимальний вміст ільменіту в континентальних відкладах становить 182,7 кг/м³. Ореоли поширення підвищеного вмісту мінералів просторово не збігаються. Дуже слабкі прямі кореляційні зв'язки існують між вмістом ільменіту і циркону (+0,12) та вмістом циркону і рутилу (+0,1); кореляційний зв'язок між вмістом ільменіту і рутилу відсутній [8].

Загалом розподіл ільменіту в пісках каолінистих і перевідкладених каолінах апту-нижнього альбу за латераллю нерівномірний (рис. 1). Ділянки підвищеного середнього вмісту ільменіту в нижньокрейдових континентальних утвореннях розмежовані у просторі (див. рис. 1). Слід зазначити, що ділянки підвищеного середнього вмісту ільменіту у пісках каолінистих і перевідкладених каолінах просторово не збігаються. У вертикальному перетині свердловин розподіл вмісту ільменіту також неоднорідний (рис. 2). Наявні від одного до трьох рівнів збагачення піску каолінистого ільменітом (див. рис. 2).

Узбережно-морські відклади верхнього альбу поширені здебільшого у східній і південно-східній частині розсипу, де вони залягають безпосередньо на корі вивітрювання, на решті частини розсипу вони збереглися від розмиву у вигляді невеликих ділянок неправильної форми. Представлені узбережно-морські відклади пісками глауконіт-кварцовими, слюдистими, слабо глинистими, зелено-сірими. Товщина відкладів 0,5–20 м, вміст ільменіту 20–60 кг/м³ і лише в окремих пробах сягає 92,4 кг/м³.

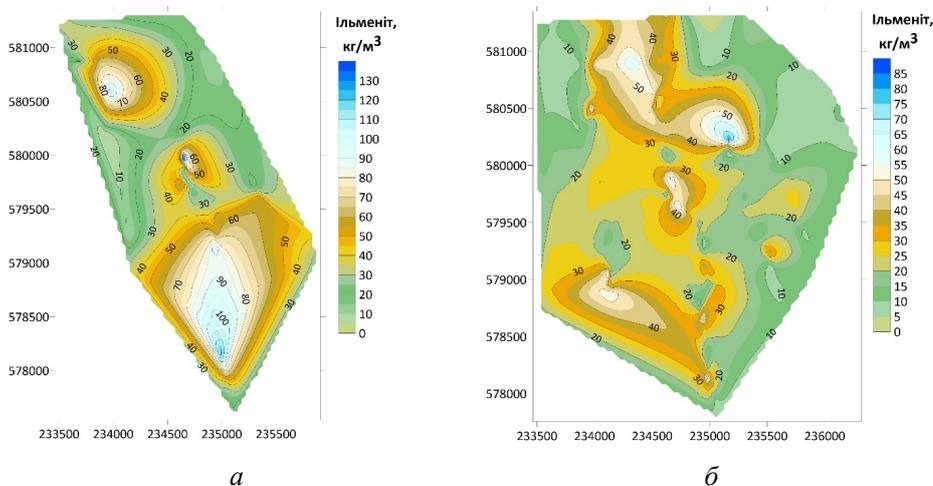


Рис. 1. Ізогіпси середнього вмісту (кг/м³) ільменіту в перевідкладених каолінах (а) і каолінистих пісках (б) апту-нижнього альбу

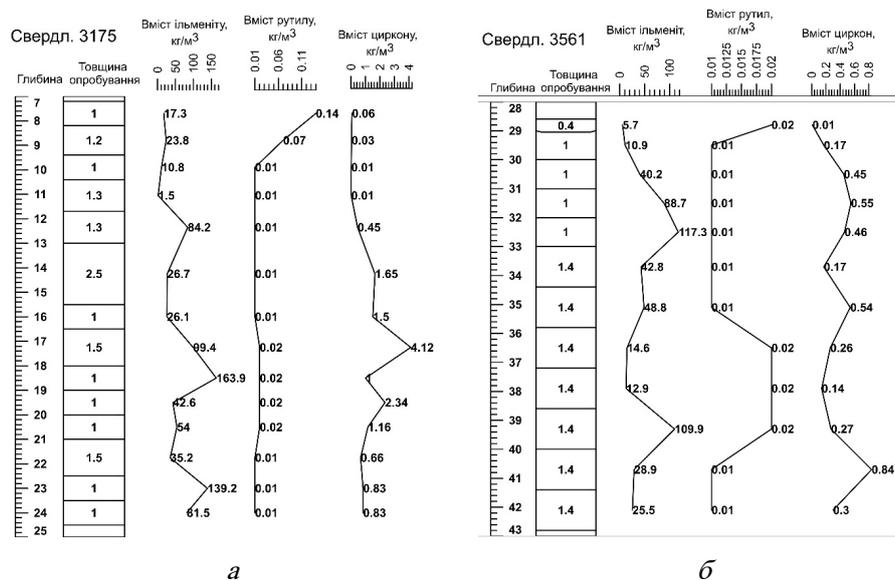


Рис. 2. Розподіл вмісту (кг/м³) ільменіту, рутилу і циркону в піщаних відкладах апту-нижнього альбу у вертикальному перетині свердловин: *а* – свердловина № 3175; *б* – свердловина № 3561

Олігоцені відклади харківської світи мають вкрай обмежене поширення у вигляді окремих неправильних ділянок на півдні й на сході Андріївського розсипу. Представлені вони практично безрудними пісками кварцовими та глауконіт-кварцовими товщиною до 14 м.

Міоценові відклади полтавської світи збереглися лише у вигляді окремих невеликих ділянок і представлені безрудними кварцовими пісками товщиною 3–8 м. Міоцен-пліоценові відклади мають вкрай обмежене поширення у вигляді окремих малого розміру ділянок та представлені практично безрудними глинами червоно-бурого, темно-сірого, зеленого забарвлення, щільними, іноді піскуватими. Середньопліоценові-нижньочетвертинні відклади мають вкрай обмежене поширення на півдні та представлені безрудними пісками цегляно-червоними та глинами.

Четвертинні відклади поширені суцільним чохлам на всій площі родовища. На вододільних ділянках вони представлені суглинками, товщиною до 20 м. У межах родовища, в долині річки Велика Вись, де річка розмиває верхньокрейдіві (верхньоальбські) узбережно-морські та нижньокрейдіві (апт-нижньоальбські) континентальні відклади, присутні сучасні четвертинні розсипи ільменіту. Незначні притоки річки розмивають кору вивітрювання кристалічних порід фундаменту. Розсип (довжина до 4,0 км; ширина 0,3–0,6 км) складений алювіальними пісками середньо-великозернистими, сірими [8]. Товщина пісків 5–8 м, іноді до 25 м. Товщина продуктивного пласта 2,7 м. Вміст ільменіту 30–61 кг/м³ (середнє 47 кг/м³) [8].

Для з'ясування якості ільменіту і просторового його поширення з різним вмістом оксидів, нами використано координати свердловин та результати хімічного аналізу ільменіту. Результати картографічного моделювання поширення середнього вмісту ільменіту в межах

ділянки відбору його проб для хімічного аналізу та латерального поширення ільменіту з різним вмістом оксидів (TiO₂, FeO, Fe₂O₃, FeO/Fe₂O₃, V₂O₅, P₂O₅, Cr₂O₃) представлено на рисунку 3. Ділянки поширення ільменіту зі значним вмістом Fe₂O₃, незначним вмістом FeO і найменшим відношенням FeO/Fe₂O₃ просторово збігаються (див. рис. 3, *в*, *г*, *д*). Менш виразно з цими ореолами збігається присутність у відкладах ільменіту з дещо збільшеним вмістом TiO₂.

Вміст оксидів (%) в ільменіті з перевідкладених каолінів апту-нижнього альбу такий: TiO₂ – 44,71–51,38; FeO – 31,05–31,86; Fe₂O₃ – 10,02–11,58; FeO/Fe₂O₃ – 2,68–3,17; V₂O₅ – 0,13–0,16; P₂O₅ – 0,067–0,10; Cr₂O₃ – 0,023–0,027.

Вміст оксидів (%) в ільменіті з нижньокрейдових континентальних піщаних відкладів такий: TiO₂ – 45,83–56,2; FeO – 24,2–35,75; Fe₂O₃ – 8,53–21,78; FeO/Fe₂O₃ – 1,11–4,15; V₂O₅ – 0,11–0,17; P₂O₅ – 0,073–0,10; Cr₂O₃ – 0,017–0,027.

Слід зазначити, що хімічний склад ільменіту з різних літотипів порід континентальних утворень апту-нижнього альбу майже подібний. Незначні відмінності присутні у вмісті TiO₂, FeO, Fe₂O₃ та співвідношенні FeO/Fe₂O₃. У перевідкладених каолінах міститься майже незмінний екзогенними процесами ільменіт на що вказує вміст TiO₂, FeO, Fe₂O₃ та співвідношення FeO/Fe₂O₃ більше за 1. У піщаних відкладах міститься майже незмінний і незначно змінений ільменіт. На незначну зміну ільменіту вказує збільшення в частині досліджених зерен вмісту TiO₂, Fe₂O₃ та зменшення вмісту FeO і зменшення співвідношення FeO/Fe₂O₃ до 1,11. Це ймовірно обумовлено більш тривалим перебуванням мінералу в седиментаційному процесі, більшою дальністю перенесення від джерела постачання у порівнянні з ільменітом із перевідкладених каолінів. Однак це не значно погіршує якісні характеристики ільменіту.

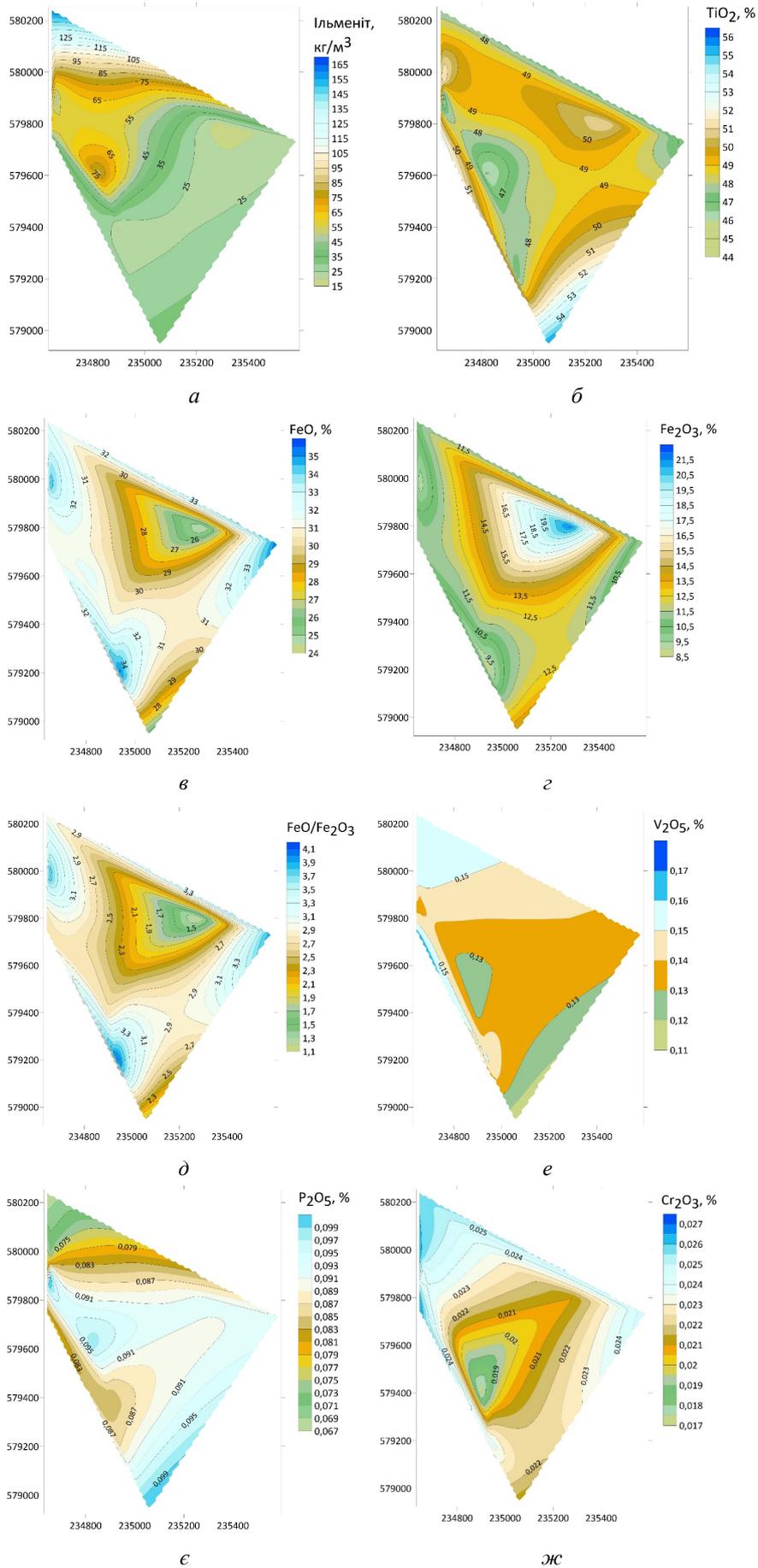


Рис. 3. Ізогінси середнього вмісту (кг/м³) ільменіту (*a*) та ільменіту з різним вмістом (%) оксидів (*б-ж*)

Дослідження напряму і сили кореляційних зв'язків між оксидами в ільменіті з перевідкладених каолінів і пісків каолінистих представлено в таблицях 1 і 2 відповідно.

В ільменіті з перевідкладених каолінів прямий сильний кореляційний зв'язок наявний між вмістом TiO_2 і Fe_2O_3 , TiO_2 і Cr_2O_3 , Fe_2O_3 і Cr_2O_3 ; обернений сильний зв'язок наявний між TiO_2 і FeO , Fe_2O_3 і FeO , P_2O_5 і V_2O_5 , P_2O_5 і Cr_2O_3 .

В ільменіті з пісків каолінистих прямий сильний кореляційний зв'язок наявний між вмістом V_2O_5 і Cr_2O_3 ; обернений сильний зв'язок наявний між Fe_2O_3 і FeO , P_2O_5 і V_2O_5 . Аналіз напряму і сили кореляційних зв'язків між оксидами в ільменіті з пісків каолінистих і каолінів перевідкладених показав, що в перевідкладених каолінах кореляційні зв'язки між оксидами хімічних елементів незалежно від напряму більш сильні, ніж у ільменіті з пісків каолінистих. Це вказує на те, що ільменіт з перевідкладених каолінів менш змінений, ніж ільменіт з піщаних відкладів.

Вміст оксидів (%) в ільменіті з четвертинних алювіальних пісків, які частково залучені до продуктивних, такий : TiO_2 – 53,34–53,39; FeO – 34,23–34,45; Fe_2O_3 – 8,17–8,67; FeO/Fe_2O_3 – 3,94–3,95; V_2O_5 – 0,19–0,21; P_2O_5 – 0,048–0,061; Cr_2O_3 – 0,039–0,063. Хімічний аналіз ільменіту вказує на те що він майже не зазнав змін в екзогенних умовах.

Висновки. Континентальні відклади апту-нижнього альбу представлені алювіальними і делювіальними відкладами, які з розмивом залягають на корі вивітрювання кристалічних порід фундаменту в межах тектонічно-ерозійної палеодолини. Кора вивітрювання була джерелом ільменіту і плотиком для континентальних утворень. Континентальні відклади представлені перевідкладеними каолінами і пісками

каолінистими. Вміст ільменіту в континентальних відкладах до 182,7кг/м³.

У перевідкладених каолінах вміст ільменіту більший, ніж у піщаних утвореннях. Зокрема, середній вміст ільменіту в перевідкладених каолінах 4,0–165,4 кг/м³, а в пісках каолінистих – 2,85–83,58 кг/м³. Ділянки підвищеного середнього вмісту ільменіту у пісках каолінистих і перевідкладених каолінах просторово не збігаються. У вертикальному перетині свердловин наявні від одного до трьох рівнів збагачення піску каолінистого ільменітом.

Хімічний склад ільменіту, просторовий розподіл його середнього вмісту та мінералу з різним вмістом оксидів у континентальних відкладах апту-нижнього альбу обумовлені хімічним складом ільменіту з кори вивітрювання, його поширенням в еловії, фаціальними умовами осадоагроадаження та перетвореннями мінералу протягом седиментогенезу.

Аналіз хімічного складу ільменіту з перевідкладених каолінів та пісків каолінистих вказує на дещо більшу зміненість ільменіту з піщаних утворень. На це вказує також відношення FeO/Fe_2O_3 в ільменіті та напрям і сила кореляційних зв'язків між вмістом оксидів в ільменіті з піщаних відкладів слабша порівняно з силою кореляційних зв'язків між вмістом оксидів в ільменіті з перевідкладених каолінів.

Загалом в ільменіті з нижньокрейдових відкладів вміст TiO_2 – 44,71–56,21 %; вміст Cr_2O_3 – 0,017–0,027 %; відношення FeO/Fe_2O_3 – 1,11–4,15. Це свідчить про те, що ільменіт у нижньокрейдових відкладах слабо змінений і має високу якість. Ділянки поширення ільменіту зі значним вмістом Fe_2O_3 , незначним вмістом FeO і найменшим відношенням FeO/Fe_2O_3 просторово збігаються. Загалом до цих ділянок приурочений ільменіт з дещо збільшеним вмістом TiO_2 .

Таблиця 1

Напряму і сила кореляційних зв'язків між оксидами в ільменіті з перевідкладених каолінів апту-нижнього альбу

	TiO_2	FeO	Fe_2O_3	V_2O_5	P_2O_5	Cr_2O_3
TiO_2	X	-0,91	+0,99	+0,02	-0,38	+0,91
FeO	-0,91	X	-0,87	+0,38	-0,03	-0,66
Fe_2O_3	+0,99	-0,87	X	+0,10	-0,45	+0,94
V_2O_5	+0,02	+0,38	+0,10	X	-0,93	+0,42
P_2O_5	-0,38	-0,03	-0,45	-0,93	X	-0,72
Cr_2O_3	+0,91	-0,66	+0,94	+0,42	-0,72	X

Таблиця 2

Напряму і сила кореляційних зв'язків між оксидами в ільменіті з пісків каолінистих апту-нижнього альбу

	TiO_2	FeO	Fe_2O_3	V_2O_5	P_2O_5	Cr_2O_3
TiO_2	X	-0,55	+0,38	0,00	-0,11	+0,17
FeO	-0,55	X	-0,90	+0,42	-0,34	+0,39
Fe_2O_3	+0,38	-0,90	X	-0,28	+0,24	-0,37
V_2O_5	0,00	+0,42	-0,28	X	-0,74	+0,72
P_2O_5	-0,11	-0,34	+0,24	-0,74	X	-0,46
Cr_2O_3	+0,17	+0,39	-0,37	+0,72	-0,46	X

Отримані результати дали можливість дослідити просторове поширення середнього вмісту ільменіту в різних літотипах порід; з'ясувати особливості розподілу його вмісту у вертикальному перетині свердловин; встановити хімічний склад, якість ільменіту та напрям і силу кореляційних зв'язків між вмістом оксидів в ільменіті з перевідкладених каолінів і пісків каолінистих та нижньокрейдових континентальних відкладів загалом; з'ясувати латеральне поширення ільменіту з різним вмістом оксидів та ступенем змінності; виокремити в межах поширення апт-нижньоальбських континентальних відкладів ділянку з більш змінним ільменітом.

Враховуючи незначну змінність ільменіту з апт-нижньоальбських континентальних відкладів, отримані результати дозволяють зробити припущення щодо якісного і кількісного складу ільменіту з кори вивітрювання і кристалічних порід фундаменту.

Зважаючи на просторову близькість з Андріївським родовищем Лікарівського родовища фосфатно-титанових руд та подібність їх генезису і геологічної будови, методика досліджень і отримані результати можуть бути використані при аналогічних дослідженнях в межах Лікарівського родовища та застосовуватися для порівняння якісних і кількісних характеристик речовинного складу ільменіту.

Література:

1. Рудько Г.І., Бала Г.Р. Критична мінеральна сировина та її перспективи в Україні. *Мінеральні ресурси України*. 2021. № 2. С. 3–14. <https://doi.org/10.31996/mru.2021.2.3-14>
2. Металічні і неметалічні корисні копалини України. Том. 1. Металічні корисні копалини. / Д. Гурський та ін.; ред.: М. Щербак, С. Гошовський. Київ–Львів: Центр Європи, 2006. 740 с.
3. Флоре Н. Переоцінка перспективних та прогнозних ресурсів провідних типів корисних копалин, виявлених на території діяльності підприємства в результаті проведення геологозйомочних та пошукових робіт станом на 01.01.2001 року на площі М-36 XX, XXV, XXVI, XXVII, XXXII, XXXIII та в межах центральної і північно-західної частин Дніпровського буровугільного басейну. Черкаси: ДП “Центрукргеологія”, 2005. 298 с.
4. Фігура Л.А., Ковальчук М.С. Ільменітоносність продуктивних відкладів та якісні параметри ільменіту Тростяницького родовища титанових руд. *Мінералогічний збірник*. 2024. № 74. С. 31–44. <https://doi.org/10.30970/min.74.03>
5. Крошко Ю.В., Ковальчук М.С. Рудоносність Аврамівського і Західного родовищ (Новомиргородській габро-анортозитовий масив). *Мінеральні ресурси України*. 2025. № 1. С. 41–49. <https://doi.org/10.31996/mru.2025.1.41-49>
6. Крошко Ю. Цифрові структурно-літологічні моделі апт-нижньоальбських і середньоєоценових континентальних розсипів ільменіту в межах Корсунь-Новомиргородського плутону. *Мінералогічний збірник*. 2016. № 66, Вип. 1. С. 30–39.
7. Крошко Ю.В. Цифрові структурно-літологічні моделі нижньокрейдових континентальних розсипів ільменіту верхньої палеотечії Лебедин-Балакліївської палеодолини (центральна частина Українського щита). *Геоінформатика*. 2016. Вип. 3(59). С. 49–57.
8. Крошко Ю.В., Ковальчук М.С. Поліхронно-полігенна парагенетично-просторова титанорудна система осадового чохла південно-західної частини Корсунь-Новомиргородського плутону. *Геохімія та рудоутворення*. 2023. Вип. 44. С. 63–88. <https://doi.org/10.15407/gof.2023.44.063>

References:

1. Rudko, H.I., Bala, H.R. (2021). Krytychna mineralna syrovyna ta yii perspektyvy v Ukraini. [Critical mineral resources and their prospects in Ukraine.] *Mineralni resursy Ukrainy*. № 2. 3–14. <https://doi.org/10.31996/mru.2021.2.3-14> [in Ukrainian].
2. Hurskyi, D. ta in (2006). Metalichni i nemetalichni korysni kopalyny Ukrainy.[Metal and non-metal minerals of Ukraine] Tom. 1. Metalichni korysni kopalyny.; red.: M. Shcherbak, S. Hoshovskyi. Kyiv–Lviv: Tsentr Yevropy, 740 s. [in Ukrainian].
3. Flore, N. (2005). Pereotsinka perspektyvnykh ta prohnoznykh resursiv providnykh typiv korysnykh kopalyn, vyavlenykh na terytorii diialnosti pidpriemstva v rezultati provedennia heolohoziomochnykh ta poshukovykh robit stanom na 01.01.2001 roku na ploskhi M-36 XX, XXV, XXVI, XXVII, XXXII, XXXIII ta v mezhakh tsentralnoi i pivnichno-zakhidnoi chastyn Dniprovskoho buruvuhilnoho basainu. [Reassessment of prospective and forecast resources of leading types of minerals discovered in the territory of the enterprise as a result of geological survey and exploration work as of January 1, 2001, in areas M-36 XX, XXV, XXVI, XXVII, XXXII, XXXIII, and within the central and north-western parts of the Dnipro coal basin.] Cherkasy: DP “Tsentrukrheolohiia”. 298 s. [in Ukrainian].
4. Figura, L.A., Kovalchuk, M.S. (2024). Ilmenitonosnist produktyvnykh vidkladiv ta yakisni parametry ilmenitu Trostianytskoho rodovyshcha tytanovykh rud. [Ilmenite content of productive deposits and quality parameters of ilmenite from the Trostyanets titanium ore deposit.] *Mineralohichniy zbirnyk*. № 74. 31–44. <https://doi.org/10.30970/min.74.03> [in Ukrainian].
5. Kroshko, Yu.V., Kovalchuk, M.S. (2025). Rudonosnist Avramivskoho i Zakhidnoho rodovyshch (Novomyrhorodskiy habro-anortozytovy masiv) [Ore content of the Avramivske and Western deposits (Novomyrhorod gabbro-anorthosite massif)] *Mineralni resursy Ukrainy*. № 1. 41–49. <https://doi.org/10.31996/mru.2025.1.41-49> [in Ukrainian].
6. Kroshko, Yu. (2016). Tsyfrovii struktorno-litolohichni modeli apt-nyzhnoalbskykh i serednoeotsenovykh kontynentalnykh rozsyviv ilmenitu v mezhakh Korsun-Novomyrhorodskoho plutonu. [Digital structural-lithological models of Aptian-Lower Albian and Middle Eocene continental ilmenite placers within the Korsun-Novomyrhorod pluton.] *Mineralohichniy zbirnyk*. № 66, Vyp. 1. 30–39. [in Ukrainian].

7. Kroshko, Yu.V. (2016). Tsyfrovi strukturno-litolohichni modeli nyzhnokreidovykh kontynentalnykh rozsyipiv ilmenitu verkhnoi paleotechii Lebedyn-Balakliivskoi paleodolyny (tsentralna chastyna Ukrainskoho shchyta) [Digital structural-lithological models of Lower Cretaceous continental ilmenite placers of the upper paleocurrent of the Lebedyn-Balakiya paleovalley (central part of the Ukrainian Shield).] *Heoinformatyka*. 2016. Vyp. 3 (59). 49–57. [in Ukrainian].

8. Kroshko, Yu.V., Kovalchuk, M.S. (2023). Polikhronno-polihenna parahenetychno-prostorova tytanorudna systema osadovoho chokhla pviddenno-zakhidnoi chastyny Korsun-Novomyrhorodskoho plutonu. [Polychronous-polygenic paragenetic-spatial titanium ore system of the sedimentary cover of the southwestern part of the Korsun-Novomyrhorod pluton.] *Neokhimiia ta rudoutvorennia*. Vyp. 44. 63–88. <https://doi.org/10.15407/gof.2023.44.063> [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 20.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 22.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025

ПЕРСПЕКТИВИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ РИЗИКИ ПРОЦЕСУ БІОКОНВЕРСІЇ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ З МУЛОВИХ ВІДКЛАДІВ ЗАНЕДБАНИХ МЕЛІОРАТИВНИХ СИСТЕМ

Легенчук Роман Васильович,

здобувач відокремленого підрозділу «Науковий лицей»
Державного університету «Житомирська політехніка»
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3240-8719>

Циганенко-Дзюбенко Ілля Юрійович,

доктор філософії (Екологія), в.о. завідувача кафедри наук про Землю,
вчитель біології відокремленого підрозділу «Науковий лицей»,
Державний університет «Житомирська політехніка»
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3240-8719>
Scopus Author ID: 59134642100

Скиба Галина Віталіївна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри наук про Землю
Державний університет «Житомирська політехніка»
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4981-4975>
Scopus Author ID: 57188747584

Капець Надія Володимирівна,

Молодший науковий співробітник, Лабораторія ліхенології та бріології,
Інститут ботаніки імені М.Г. Холодного НАН України, м. Київ, Україна
Дністровський регіональний ландшафтний парк, м. Тлумач, Україна
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7970-8682>
Scopus Author ID: 57203911510

*Стаття присвячена аналізу перспектив та технологічних ризиків біоконверсії мулових відкладів занедбаних меліоративних систем України у органо-мінеральні добрива. Розглянуто наукові підходи до комплексної характеристики субстрату через триступеневу ієрархію досліджень: фізико-хімічну, агрохімічну та мікробіологічну оцінку сировини. Проаналізовано міжнародні дослідження ефективності біоконверсії органічних відходів, включаючи роботи з термофільними бактеріальними культурами *Bacillus thermoamylovorans* (67% редукції органічної речовини за 10 діб при 60°C), гідротермальної карбонізації з вилученням азоту з відкладів (6-8% сухої речовини), багатоступневих анаеробних систем (підвищення продукції метану на 10-30%) та твердофазної ферментації з ризосферними бактеріями *Burkholderia cepacia*. Систематизовано результати польових випробувань біоконвертованих добрив у лентильно-кукурудзяній ротації (підвищення мікробної біомаси вуглецю на 126%, азоту на 49%, зниження еволюції CO₂ на 25%). Представлено концептуальну технологічну схему біоферментації з контрольованими параметрами: вологість 50-60%, температура 50-65°C, рН 6,5-8,0, оптимальне співвідношення C:N 25-30:1, використання селекційованих штамів термофільних мікроорганізмів та контрольованої аерації. Визначено агроекологічні переваги технології: відновлення функціональності меліоративних систем, заміщення мінеральних добрив, покращення структури ґрунтів, пролонговану дію поживних речовин та зниження ризиків евтрофікації. Проведено системну класифікацію технологічних ризиків за трьома категоріями: мікробіологічні (патогенна контамінація, неповна біоконверсія), хімічні (біоаккумуляція важких металів, втрати поживних речовин) та технічні (нестабільність процесу, енергетичні витрати, сезонна варіабельність сировини). Запропоновано інтегровану систему управління ризиками на основі принципів HACCP з автоматизованими системами моніторингу та превентивним контролем критичних параметрів.*

Ключові слова: біоконверсія, мулові відклади, органо-мінеральні добрива, меліоративні системи, технологічні ризики, екологічна безпека.

Lehenchuk Roman, Tsyhanenko-Dziubenko Illia, Skyba Halyna, Kapets Nadiia. Prospects and technological risks of the bioconversion process of organo-mineral fertilizers from sludge deposits of neglected reclamation systems

*The article analyzes prospects and technological risks of bioconversion of sludge deposits from neglected reclamation systems of Ukraine into organo-mineral fertilizers. Scientific approaches to comprehensive substrate characterization through three-level research hierarchy are considered: physico-chemical, agrochemical and microbiological assessment of raw materials. International studies on organic waste bioconversion efficiency are analyzed, including works with thermophilic bacterial cultures *Bacillus thermoamylovorans* (67% organic matter reduction in 10 days at 60°C), hydrothermal carbonization with nitrogen extraction from deposits (6-8% dry*

matter), multi-stage anaerobic systems (10-30% methane production increase) and solid-phase fermentation with rhizosphere bacteria *Burkholderia cenocepacia*. Results of field trials of bioconverted fertilizers in lentil-corn rotation are systematized (126% increase in soil microbial carbon biomass, 49% nitrogen increase, 25% CO₂ evolution reduction). A conceptual technological scheme of biofermentation with controlled parameters is presented: humidity 50-60%, temperature 50-65°C, pH 6.5-8.0, optimal C:N ratio 25-30:1, use of selected thermophilic microorganism strains and controlled aeration. Agroecological advantages of the technology are identified: restoration of reclamation systems functionality, mineral fertilizer substitution, soil structure improvement, prolonged nutrient action and eutrophication risk reduction. Systematic classification of technological risks by three categories is conducted: microbiological (pathogenic contamination, incomplete bioconversion), chemical (heavy metals bioaccumulation, nutrient losses) and technical (process instability, energy costs, seasonal raw material variability). An integrated risk management system based on HACCP principles with automated monitoring systems and preventive control of critical parameters is proposed. The review demonstrates high potential of sludge bioconversion technology for sustainable agricultural development while requiring comprehensive risk management strategies for successful commercialization.

Key words: bioconversion, sludge deposits, organo-mineral fertilizers, reclamation systems, technological risks, environmental safety.

Вступ. Сучасний аграрний сектор України перебуває в умовах постійного пошуку інноваційних рішень, які дозволили б одночасно підвищити ефективність виробництва та зменшити екологічний тиск на довкілля. Однією з гострих проблем залишається накопичення значних обсягів мулових відкладів у занедбаних меліоративних системах, що втратили свою функціональність через багаторічну відсутність належного догляду та обслуговування. Ці відклади містять велику кількість органічної речовини та мінеральних компонентів, проте в їхньому складі можуть бути присутні й токсичні елементи, включаючи важкі метали та патогенні мікроорганізми. Таким чином, вони виступають як екологічною загрозою, так і потенційно цінним ресурсом. Розробка технологій їх безпечної переробки з утворенням добрив є стратегічно важливим завданням для агроекономіки країни.

Наукова новизна даного дослідження полягає у комплексному підході до біоконверсії мулових відкладів з урахуванням трьох ключових складових: детальної характеристики сировини, оптимізації технологічних параметрів процесу та системного управління технологічними ризиками. На відміну від більшості існуючих робіт, де біоконверсія розглядається переважно з точки зору перетворення органічної речовини, у даній роботі застосовано інтеграцію знань з біотехнології, агрохімії, екології та інженерії біопроектів. Це дозволило не лише створити ефективну технологічну схему, але й передбачити заходи, які забезпечують стабільну якість і безпечність кінцевого продукту при промисловому масштабуванні.

Впровадження технології біоконверсії мулових відкладів у виробництво орґано-мінеральних добрив здатне вирішити одразу кілька актуальних проблем. По-перше, це утилізація накопичених екологічно небезпечних відходів, що дозволить відновити функціонування меліоративних систем та зменшити забруднення водних екосистем. По-друге, заміщення частини мінеральних добрив орґано-мінеральними аналогами дасть можливість знизити собівартість аграрної продукції та зменшити залежність України від імпорту добрив, що особливо актуально в умовах нестабільної кон'юнктури світових ринків. По-третє, розвиток локального виробництва створить нові робочі місця в сільській місцевості та стимулюватиме розвиток зеленої економіки.

Метою роботи є визначення перспектив впровадження технології біоконверсії мулових відкладів занедбаних меліоративних систем у виробництво орґано-мінеральних добрив з урахуванням екологічних, агрономічних та економічних аспектів, а також ідентифікація й аналіз технологічних ризиків, що можуть виникати під час реалізації цього процесу. Досягнення мети передбачає виконання комплексних завдань: дослідження складу та властивостей мулових відкладів, розробка оптимальної технологічної схеми біоконверсії, оцінка ефективності та безпечності кінцевого продукту, а також створення системи управління ризиками.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження базувалося на аналізі наукової літератури в базах даних Scopus, Web of Science та PubMed за 2018-2025 роки. Пошук проводився за ключовими словами «bioconversion», «sludge deposits», «organic fertilizers». Відбиралися публікації з експериментальними даними про ефективність біоконверсії та технологічні параметри процесів. Результати систематизувалися для визначення оптимальних режимів роботи біотехнологічних систем.

Для розробки концептуальної технологічної схеми використовувався системний підхід до аналізу біопроектів. Класифікація технологічних ризиків проводилася за категоріями: мікробіологічні, хімічні та технічні загрози з оцінкою їх потенційного впливу. Аналіз перспектив впровадження враховував екологічні, агрономічні та економічні аспекти технології біоконверсії мулових відкладів.

Аналіз попередніх досліджень. Проблематика біоконверсії органічних відходів у добрива активно досліджується міжнародною науковою спільнотою протягом останніх двох десятиліть, що обумовлено зростаючими екологічними викликами та потребою у сталому сільськогосподарському виробництві. Інтенсивні аеробні процеси біоконверсії демонструють високу ефективність трансформації органічної речовини з досягненням 67% редукції за 10 діб при використанні термофільних бактеріальних культур *Bacillus thermoamylovorans* за контрольованої температури 60°C [1]. Гідротермальна карбонізація, розроблена польськими дослідниками, забезпечує ефективне вилучення азоту з мулових відкладів з вмістом 6-8% сухої речовини при одночасному збереженні критично важливих фосфорних та азотних

сполук відповідно до вимог Директиви ЄС про добрива [2]. Багатоступеневі анаеробні системи з оптимізацією рН, температури та часу утримання демонструють підвищення продукції метану на 10-30%, при цьому термофільні умови (50-55°C) забезпечують прискорений гідроліз порівняно з мезофільними системами [3].

Розвиток технологій біоконверсії органічних відходів базується на принципах циркулярної економіки, що знайшло відображення у створенні біооснованих добрив як практичного підходу до замкнутого циклу виробництва [2]. Дослідження ефективності різних субстратів показують, що використання золи вугілля як ко-компостуючого матеріалу для мулових відкладів [1] поєднується з оптимізацією параметрів анаеробного зброджування для максимального виходу біогазу [3]. Особливий інтерес представляють технології твердофазної ферментації агровідходів, зокрема застосування ризосферних бактерій *Burkholderia cephalosporia* для створення біоорганічних добрив [4], що доповнюється методологією поверхні відгуку для оптимізації умов ферментації овочевих відходів [5]. Перспективним напрямом є також розробка рідких біодобрив на основі промислових ферментаційних фільтратів з використанням *Bacillus cereus* [6], ефективність яких підтверджується польовими дослідженнями застосування біовугілля в поєднанні з біодобривами у системах вирощування бобових культур [7].

Системний підхід до екологічної безпеки біоконверсії потребує комплексного моніторингу забруднення важкими металами в органічних добривах з урахуванням темпоральних тенденцій [8] та забезпечення безпечного рівня мікроорганізмів у продуктах для систем ґрунт-рослина [9]. Інноваційні методи стабілізації важких металів через біоконверсію з використанням личинок мух та деградацію антибіотиків під час компостування [10] узгоджуються з європейськими стратегіями розвитку біогазових технологій [11]. Українські наукові дослідження формують потужну теоретичну базу для розробки національних технологій біоконверсії, включаючи прогнозування гідроекологічного стану річкових систем [12], комплексний бібліометричний аналіз світових тенденцій у дослідженнях донних відкладів [13] та розробку інноваційних підходів до сталого використання природних ресурсів України [14]. Особливе значення мають дослідження просторової диференціації важких металів в урбанізованих гідроекосистемах [15], біомаркерів стійкості макрофітів до токсичних стресорів військового походження [16], інтегральної оцінки ефективності управління водними ресурсами для сталого розвитку [17], екологічного впливу військових дій на гідромережу з розробкою стратегій відновлення [18], застосування багатовимірних статистичних методів для аналізу кліматичних змін [19] та ідентифікації антропогенних детермінант деградації гідрохімічних показників водних об'єктів [20].

Технології твердофазної ферментації з використанням ризосферних бактерій-стимуляторів росту рослин виявляють винятковий потенціал для біоконверсії седиментних відкладів. Дослідження з *Burkholderia*

cepahalosporia, підтверджені повногеномним секвенуванням 7157 кодуєчих послідовностей, оптимізованих для мобілізації поживних речовин, демонструють значне підвищення вмісту азоту та покращення схожості насіння кукурудзи [4]. Статистична оптимізація методом поверхні відгуку з центральним композитним дизайном досягає оптимальних умов ферментації протягом 11-17 діб з 5-15 мл біоактиватора [5], тоді як D-оптимальні методи змішаного дизайну забезпечують отримання $(1,59 \pm 0,01) \cdot 10^8$ КУО/мл за оптимальних умов з комплексними метаболітними профілями, включаючи β -аланіл-L-лізин, ансерин та корисні для рослин сполуки [6]. Польові випробування біоконвертованих добрив у системах лентильно-кукурудзяної ротації демонструють підвищення мікробної біомаси вуглецю на 126% та азоту на 49% при одночасному зниженні еволюції CO₂ на 25% [7].

Комплексні протоколи оцінки ризиків адресують три критичні категорії контамінації в процесах біоконверсії органічних відходів. Аналіз важких металів у 74 комерційних органічних добривах виявив концентраційні діапазони As (1,55-36,95 мг/кг), Cd (0,15-7,49 мг/кг) та Pb (1,43-78,05 мг/кг), при цьому математичні моделі встановлюють максимальні безпечні періоди застосування 20-50 років залежно від концентрацій металів [8]. Протоколи управління патогенами вимагають температурно-часових комбінацій $\geq 50^\circ\text{C}$ протягом 10+ діб або $\geq 60^\circ\text{C}$ протягом 5+ діб для ефективної інактивації *Salmonella* spp., *E. coli* O157:H7 та інших критичних патогенів відповідно до регуляцій Європейської Комісії [9]. Інтегровані підходи біоконверсії, що включають 45-денну біоконверсію личинками мух у поєднанні з аеробним компостуванням, демонструють посилену іммобілізацію важких металів через комплексоутворення з гуміновими кислотами при одночасній деградації тетрациклінів та хінолонів за кінетикою першого порядку [10]. Економічна життєздатність підтверджується австрійськими та німецькими підприємствами, що досягають €180,000 чистого прибутку від переробки 100,000 тонн відходів щорічно з 37% енергетичним відновленням [11].

Аналіз міжнародних наукових досліджень підтверджує високу технологічну зрілість процесів біоконверсії органічних відходів у добрива з доведеною ефективністю трансформації органічної речовини (до 67% редукції за 10 діб) та значними агроекологічними перевагами, включаючи підвищення мікробної біомаси ґрунту на 126% та зниження емісії CO₂ на 25%. Водночас критичними факторами успішної комерціалізації технології є забезпечення мікробіологічної безпеки через контрольовані температурно-часові режими ($\geq 50^\circ\text{C}$ протягом 10+ діб) та управління концентраціями важких металів у межах регуляторних вимог, що разом з економічною життєздатністю (до €180,000 чистого прибутку на 100,000 тонн відходів) формує наукове обґрунтування для розробки вітчизняної технології біоконверсії мулових відкладів меліоративних систем.

Результати дослідження. Сучасні виклики сталого розвитку аграрного сектору актуалізують

необхідність розробки інноваційних підходів до утилізації органічних відходів із одночасним забезпеченням сільського господарства екологічно безпечними добривами. Занедбані меліоративні системи України акумулювали значні обсяги мулу, що представляють собою потенційно цінний ресурс для виробництва органо-мінеральних добрив методом біоконверсії. Розробка наукових основ цього процесу потребує комплексного аналізу характеристик вихідної сировини, оптимізації технологічних параметрів, оцінки перспектив впровадження та ідентифікації технологічних ризиків.

Методологічна основа дослідження базується на системному підході до аналізу біотехнологічного процесу, що включає послідовні етапи від характеристики субстрату до оцінки технологічних ризиків готової технології. Представлена концептуальна модель інтегрує фундаментальні принципи біотехнології, агрохімії та екологічної безпеки для створення науково обґрунтованої технології переробки мулових відкладів.

Ефективність біотехнологічного процесу критично залежить від комплексної характеристики вихідного субстрату, що визначає стратегію технологічного процесу та прогнозує якісні параметри кінцевого продукту (рис. 1). Системний підхід до аналізу мулових відкладів базується на триступеневій ієрархії досліджень, кожен рівень якої вносить специфічний внесок у формування технологічних рішень.

Фізико-хімічна характеристика субстрату формує фундаментальну основу для проектування біореакторних систем та оптимізації масообмінних процесів. Гранулометричний склад відкладів детермінує структурно-механічні властивості субстрату, що безпосередньо корелює з ефективністю кисневого масопереносу та гідродинамічними характеристиками біореакторної системи. Дослідження показують, що оптимальне співвідношення різних фракцій забезпечує створення стійкої пористої структури, необхідної для підтримання аеробних умов біоконверсії.

Водно-фізичні властивості субстрату, характеризовані показниками вологості та щільності, визначають реологічні характеристики біомаси та енергетичні затрати на перемішування. Електрохімічні параметри (рН та електропровідність) відображають іонний склад середовища та його буферну ємність, що критично впливає на метаболічну активність мікробних консорціумів та стабільність біохімічних процесів.

Агрохімічна цінність мулових відкладів визначається балансом макро- та мікроелементів, що формує потенційну ефективність майбутнього добрива. Співвідношення основних біогенних елементів (N:P:K) у поєднанні з комплексом мікроелементів створює передумови для отримання комплексних добрив пролонгованої дії. Водночас присутність важких металів та ксенобіотиків потребує детального токсикологічного аналізу для забезпечення екологічної безпеки кінцевого продукту.

Мікробіологічний профіль субстрату відображає його біологічний потенціал та визначає стратегію біоаугментації процесу. Природні мікробні угруповання мулових відкладів характеризуються високою біорізноманітністю, що створює сприятливі умови для формування стабільних біоценозів у процесі біоконверсії. Однак потенційна присутність патогенних мікроорганізмів актуалізує необхідність розробки ефективних методів біологічної санітації субстрату.

Розробка технологічної схеми біоконверсії базується на принципах контрольованої біоферментації з управлінням ключовими технологічними параметрами для досягнення максимальної ефективності процесу та якості продукту (рис. 2). Технологічна архітектура процесу інтегрує сучасні досягнення біотехнології та інженерії біопроцесів для створення економічно ефективної та екологічно безпечної технології.

Етап підготовки сировини представляє критично важливу фазу технологічного процесу, що визначає ефективність подальших біотрансформацій. Гомогенізація субстрату та створення оптимальної струк-

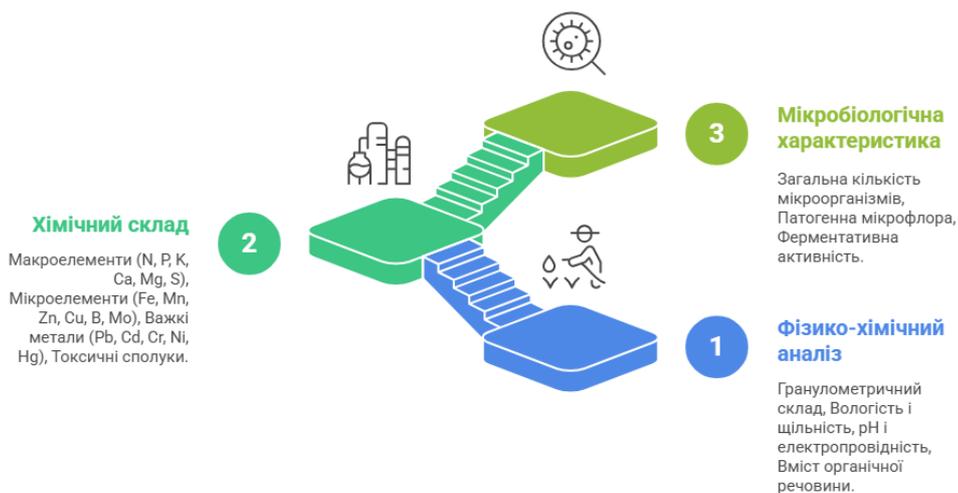


Рис. 1. Триступенева ієрархія досліджень мулових відкладів меліоративних каналів (розроблено авторами)

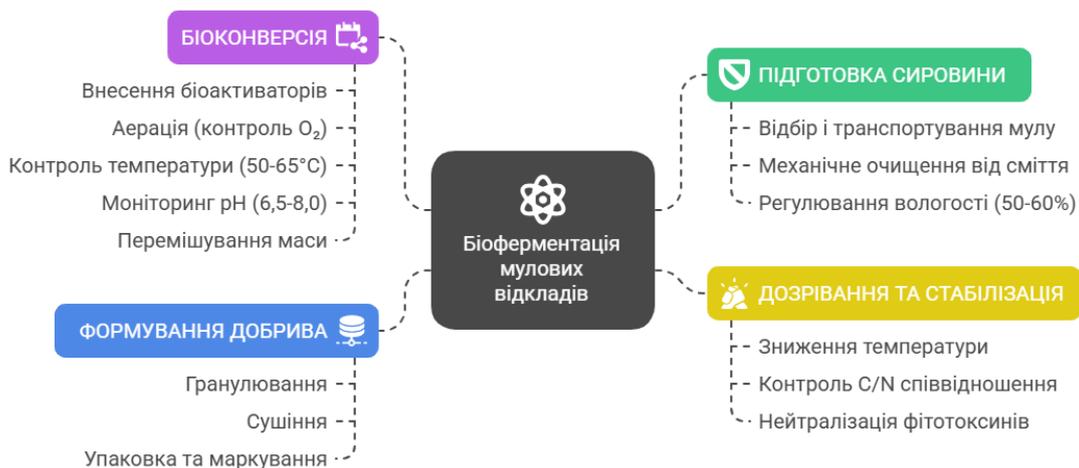


Рис. 2. Технологічна схема біоферментації мулових відкладів у органо-мінеральні добрива (розроблено авторами)

турно-механічної матриці забезпечують рівномірний розподіл поживних речовин та ефективний масообмін у біореакторній системі. Регулювання вологості до діапазону 50-60% створює оптимальні умови для аеробної біодеградації з мінімізацією ризиків анаеробної ферментації та утворення небажаних метаболітів.

Центральний процес біоферментації реалізується через контрольоване культивування мікробних консорціумів в умовах оптимізованих технологічних параметрів. Стратегія біоаугментації передбачає використання селекційованих штамів мікроорганізмів з високою деструктивною активністю та доведеною безпечністю. Система аерації забезпечує підтримання концентрації розчиненого кисню на рівні, достатньому для повної мінералізації органічних сполук та запобігання утворенню анаеробних зон.

Температурний режим біоферментації в діапазоні 50-65°C оптимізує кінетику біохімічних реакцій та забезпечує ефективну санітацію субстрату. Термофільні умови сприяють прискореній деструкції целюлозолігнінового комплексу та елімінації патогенних мікроорганізмів, включаючи вегетативні форми бактерій, віруси та яйця гельмінтів. Контроль рН у лужному діапазоні (6,5-8,0) підтримує оптимальні умови для життєдіяльності целюлолітичних та протеолітичних мікроорганізмів.

Фаза дозрівання та стабілізації характеризується трансформацією продуктів первинної біодеградації у стабільні гумусоподібні сполуки з пролонгованими агрономічними властивостями. Контрольоване зниження температури та досягнення оптимального співвідношення C:N (25-30:1) індикують завершення активної фази біоконверсії та формування агрономічно ефективного продукту. Процеси гуміфікації забезпечують створення стабільних органо-мінеральних комплексів з підвищеною сорбційною ємністю та катіонообмінними властивостями.

Технологічне завершення процесу включає гранулювання біомаси для покращення фізико-механічних

властивостей добрива та забезпечення його технологічності при внесенні. Контрольоване дегідратування знижує активність води до рівня, що запобігає мікробіологічному псуванню продукту під час зберігання та транспортування.

Комплексна оцінка перспектив впровадження технології біоконверсії виявляє системні синергетичні ефекти, що виходять за межі простої утилізації відходів та створюють передумови для сталого розвитку аграрних територій (рис. 3). Інтеграція екологічних, агрономічних та економічних переваг формує мультиплікативний ефект, що значно перевищує суму окремих компонентів.

Екологічна ефективність технології реалізується через трансформацію екологічного навантаження у ресурсний потенціал, що відповідає принципам циркулярної економіки. Біоконверсія мулових відкладів ліквідує накопичені органічні забруднення меліоративних систем, відновлюючи їх функціональну ефективність та екосистемні сервіси. Регенерація меліоративної інфраструктури забезпечує відновлення гідрологічного режиму території, що особливо актуально в умовах кліматичних змін та дефіциту водних ресурсів.

Заміщення мінеральних добрив біоконвертованими аналогами знижує антропогенне навантаження на агро-екосистеми та зменшує ризики евтрофікації водних об'єктів. Органо-мінеральні добрива характеризуються пролонгованою дією та мінімальними втратами поживних речовин через інфільтрацію та поверхневий стік, що підвищує екологічну безпеку агротехнологій.

Агрономічні переваги технології базуються на комплексному впливі біоконвертованих добрив на родючість ґрунтів та продуктивність агроценозів. Внесення стабілізованої органічної речовини покращує агрегатну структуру ґрунту, підвищує його водоутримуючу здатність та аерацію кореневої зони. Формування органо-мінеральних комплексів збільшує катіонообмінну ємність ґрунту та покращує доступність поживних речовин для рослин.



Рис. 3. Агроекологічні та економічні перспективи впровадження біоконверсії мулових відкладів (розроблено авторами)

Пролонгована дія біоконвертованих добрив забезпечується поступовим вивільненням поживних речовин у результаті мікробіологічної деструкції органічних комплексів, що синхронізується з потребами рослин у різні фази вегетації. Це знижує ризики перегноювання культур та мінімізує втрати елементів живлення з агро-екосистеми.

Економічна ефективність проєкту формується через низьку собівартість вихідної сировини та високу додану вартість кінцевого продукту. Мулові відклади меліоративних систем практично безкоштовні та одночасно представляють проблему, вирішення якої має додаткову економічну цінність. Створення локальних виробництв біоконвертованих добрив генерує нові робочі місця в сільській місцевості та сприяє соціально-економічному розвитку територій.

Імпортозаміщення мінеральних добрив підвищує продовольчу безпеку країни та знижує залежність аграрного сектору від кон'юнктури світових ринків. Локалізація виробництва добрив знижує логістичні витрати та забезпечує оперативну доставку продукції споживачам.

Ідентифікація та оцінка технологічних ризиків біоконверсії є критично важливою для розробки надійної та безпечної технології промислового масштабу (рис. 4). Системний аналіз потенційних загроз дозволяє розробити комплексну стратегію управління ризиками з превентивною орієнтацією.

Мікробіологічні ризики представляють найбільш критичну категорію загроз через їх безпосередній вплив на безпечність процесу та якість продукції. Контамінація патогенними мікроорганізмами може трансформувати корисний продукт у джерело біологічної небезпеки. Стратегія мікробіологічного контролю базується на принципах НАССР (Hazard Analysis and Critical Control Points)

з ідентифікацією критичних контрольних точок та встановленням критичних меж для ключових параметрів.

Термічна санітація субстрату в діапазоні 50-65°C забезпечує елімінацію вегетативних форм патогенів, однак потребує додаткових заходів для інактивації спорових форм бактерій. Контрольована аерація запобігає створенню анаеробних зон, що могли б сприяти розвитку патогенних анаеробних мікроорганізмів, включаючи збудників ботулізму та газової гангрені.

Неповна біоконверсія органічних субстратів може призводити до накопичення фітотоксичних сполук, включаючи органічні кислоти, аміак та інші метаболіти неповної деструкції. Моніторинг біохімічних маркерів завершення процесу, включаючи співвідношення C:N, рН та концентрацію аміачного азоту, дозволяє об'єктивно оцінити ступінь зрілості продукту.

Хімічні ризики пов'язані з потенційною концентрацією токсичних сполук у процесі біоконверсії та можливими хімічними трансформаціями вихідних забруднювачів. Біоаккумуляція важких металів у мікробній біомасі може призводити до їх концентрування у кінцевому продукті. Стратегія детоксикації включає попередню обробку субстрату методами хімічного осадження, біоорбції або фітореMediaції.

Втрати поживних речовин через волатилізацію азотних сполук, денітрифікацію або вимивання знижують агрономічну цінність продукту та погіршують економічні показники процесу. Оптимізація технологічних параметрів, включаючи систему аерації, водний режим та рН, мінімізує ці втрати та забезпечує максимальне збереження елементів живлення.

Технічні ризики охоплюють аспекти технологічної надійності та масштабованості процесу. Нестабільність біологічного процесу може призводити до значних



Рис. 4. Класифікація технологічних ризиків біоконверсії та методи їх превентивного усунення (розроблено авторами)

коливань якості продукції та економічних втрат. Впровадження автоматизованих систем контролю з використанням сучасних сенсорних технологій забезпечує реал-тайм моніторинг критичних параметрів та оперативну корекцію технологічного режиму.

Енергетичні витрати на аерацію, перемішування та термостатування можуть становити значну частку операційних витрат. Стратегія енергетичної оптимізації включає рекуперацію тепла біологічних процесів, використання відновлювальних джерел енергії та впровадження енергоефективних технологій.

Сезонна варіабельність доступності сировини створює ризики для безперервності виробничого процесу. Диверсифікація джерел мулових відкладів, створення буферних запасів та розробка технологій консервації субстрату забезпечують стабільність сировинної бази.

Інтегрована система управління ризиками базується на принципах превентивного контролю з мультирівневою архітектурою безпеки. Постійний моніторинг біологічних, хімічних та фізичних параметрів процесу забезпечує раннє виявлення відхилень та оперативне прийняття корегувальних заходів. Стандартизація операційних процедур та систематична підготовка персоналу мінімізують ризики, пов'язані з людським фактором.

Системний аналіз перспектив та ризиків біоконверсії мулових відкладів занедбаних меліоративних систем демонструє високий потенціал цієї технології для сталого розвитку аграрного сектору. Комплексний підхід до характеристики субстрату, оптимізації технологічних параметрів та управління ризиками створює наукове підґрунтя для розробки промислово масштабованої технології виробництва органо-мінеральних добрив.

Синергетичні ефекти впровадження технології, що поєднують екологічні, агрономічні та економічні переваги, формують передумови для створення економічно ефективних та екологічно безпечних виробництв. Превентивна стратегія управління технологічними ризи-

ками забезпечує надійність процесу та безпечність продукції, що є критично важливим для комерціалізації технології.

Подальші дослідження будуть зосереджені на оптимізації мікробних консорціумів для специфічних типів мулових відкладів, розробці енергоефективних технологічних рішень та створенні адаптивних систем управління біопроцесами для різних кліматичних умов.

Висновки. Мулові відклади занедбаних меліоративних систем є перспективною сировиною для виробництва органо-мінеральних добрив завдяки високому вмісту органічної речовини та комплексу біогенних елементів (N, P, K та мікроелементів). Їх утилізація дозволяє одночасно вирішувати екологічну проблему накопичення відходів і створювати цінний агрономічний продукт.

Проведені дослідження зарубіжних авторів підтверджують, що термофільні умови (50–65°C), оптимальна вологість (50–60%), контроль pH (6,5–8,0) та рівномірний розподіл субстрату забезпечують інтенсивну мінералізацію органічної речовини, ефективну санітарну обробку та формування стабільних органо-мінеральних комплексів з пролонгованою дією.

Впровадження біоконверсії сприяє заміщенню мінеральних добрив, зниженню ризику евтрофікації водних об'єктів, відновленню гідрологічного режиму меліоративних систем, покращенню структури та водоутримуючої здатності ґрунтів, а також забезпечує поступове вивільнення поживних речовин відповідно до потреб рослин.

Технологія має високу економічну привабливість через безкоштовну або низькоартісну сировину, можливість створення локальних виробництв, зниження залежності від імпорту добрив та формування доданої вартості. Це забезпечує зростання прибутковості агро-виробництва та розвиток сільських територій.

Серед основних ризиків – мікробіологічна контамінація, накопичення важких металів, утворення

фітотоксичних сполук, енергетичні витрати та сезонна нерівномірність надходження сировини. Рекомендовано впроваджувати НАССР, автоматизовані системи моніторингу та енергоефективні технології, а також створювати буферні запаси субстрату.

Подальші роботи мають бути спрямовані на вдосконалення мікробних консорціумів для специфічних типів мулових відкладів, розробку адаптивних технологій під різні кліматичні умови та інтеграцію процесів біоконверсії у стратегії циркулярної економіки.

Література:

1. Wong J.W.C., Fang M., Li G.X., Wong M.H. Feasibility of using coal ash residues as co-composting materials for sewage sludge // *Environmental Technology*. 2002. Vol. 23. Issue 10. P. 1117-1124. DOI: 10.1080/09593332308618312
2. Chojnacka K., Moustakas K., Witek-Krowiak A. Bio-based fertilizers: A practical approach towards circular economy // *Bioresour. Technol.* 2020. Vol. 295. 122223. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122223
3. Negi S., Dhar H., Kumar S., Singh S. Optimization of anaerobic digestion parameters for enhanced biogas production: A comprehensive review // *Water*. 2024. Vol. 16. Issue 3. 412. DOI: 10.3390/w16030412
4. Arshad M., Ali I., Rasheed R., Bahadur S., Ahmad M., Mahmood T., Hussain A. Formulation and efficacy testing of bio-organic fertilizer produced through solid-state fermentation of agro-waste by *Burkholderia cenocepacia* // *Microorganisms*. 2021. Vol. 9. Issue 11. 2360. DOI: 10.3390/microorganisms9112360
5. Sari D.K., Hidayat N., Fajriah S., Wijaya A. Optimization of fermentation condition to produce liquid organic fertilizer (LOF) from rotten vegetable waste using response surface methodology // *Chemical Engineering and Technology*. 2023. Vol. 46. Issue 7. P. 1425-1432. DOI: 10.1002/ceat.202200585
6. Huang Z., Li Y., Chen B., Su S., Zhang W. Recovery and utilization of waste filtrate from industrial biological fermentation: Development and metabolite profile of the *Bacillus cereus* liquid bio-fertilizer // *Journal of Biotechnology*. 2023. Vol. 363. P. 28-38. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2023.01.008
7. Ahmad I., Zhu G., Zhou G., Liu M., Ahmad S., Murad W., Stokes C.E., Ahmad A., Habib A. Biochar particle size coupled with biofertilizer enhances soil carbon-nitrogen microbial pools and CO₂ sequestration in lentil // *Frontiers in Environmental Science*. 2023. Vol. 11. 1114728. DOI: 10.3389/fenvs.2023.1114728
8. Su C., Liu K., Zhang H., Chang S.X., Fang Y. Heavy metal contamination in organic fertilizers: Risk assessment and temporal trends (2000-2022) // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. 1355. DOI: 10.1038/s41598-025-85025-1
9. Vassileva M., Flor-Peregrin E., Malusá E., Requena N.E. Safety level of microorganism-bearing products applied in soil-plant systems // *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. 862875. DOI: 10.3389/fpls.2022.862875
10. Lu J., Wang H., Zhang C., Zhao G., Zhang Q. Housefly larva bioconversion enhances heavy metal stabilization and antibiotic degradation during chicken manure composting // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. 1267. DOI: 10.1038/s41598-025-85267-3
11. Scarlat N., Dallemand J.F., Fahl F. Biogas: Developments and perspectives in Europe // *Renewable Energy*. 2018. Vol. 129. P. 457-472. DOI: 10.1016/j.renene.2018.03.006
12. Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Кірейцева Г.В., Скиба Г.В. Прогнозування гідроекологічного стану річки Тетерів з використанням модифікованої моделі Стрітера-Фелпса. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 2025. № 1(75). С. 53-64. DOI: 10.17721/2306-5680.2025.1.6
13. Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Кірейцева Г.В., Хамдош І.Н., Вовк В.М. Бібліометричний аналіз світових досліджень донних відкладів: тенденції публікацій та напрями розвитку седиментології. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 2025. № 2(76). С. 6-20. DOI: 10.17721/2306-5680.2025.2.1
14. Kapelista I., Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Khomenko S., Vovk V. Review of Innovative Approaches for Sustainable Use of Ukraine's Natural Resources. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2024. Vol. 7, No. 3. P. 378-395. DOI: 10.33002/nr2581.6853.0703ukr19
15. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Shomko O., Gandziura V., Khamdosh I. Analytical assessment of heavy metals polyelement distribution in urbanized hydroecosystem components: spatial differentiation and migration patterns. *Journal Environmental Problems*. 2025. Vol. 10, No. 2. P. 135-144. DOI: 10.23939/ep2025.02.135
16. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Fonseca Araújo J. Physiological and biochemical biomarkers of macrophyte resilience to military-related toxic stressors. *Journal Environmental Problems*. 2024. Vol. 9, No. 4. P. 227-234. DOI: 10.23939/ep2024.04.227
17. Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Khomenko S., Palii O. Integral assessment of the effectiveness of water resource management in communities for sustainable development. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 27-38. DOI: 10.69628/esbur/1.2025.27
18. Кірейцева Г.В., Циганенко-Дзюбенко І.Ю. Екологічна оцінка впливу військових дій на гідромережу Київської області та стратегії відновлення водних екосистем. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2025. № 1 (499). С. 199-207. DOI: 10.15589/znp2025.1(499).28
19. Кірейцева Г.В., Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Хоменко С.В., Легенчук Р.В. Застосування багатомірних статистичних методів для аналізу кліматичних проєкцій. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки*. Серія: Технічні науки. 2025. № 3. С. 26-33. DOI: 10.32782/3041-2080/2025-3-3
20. Кірейцева Г.В., Циганенко-Дзюбенко І.Ю. Антропогенні детермінанти деградації гідрохімічних показників водних об'єктів. *Вісник Хмельницького національного університету*. Серія: Технічні науки. 2025. Том 349, № 2. С. 540-548. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-349-80

References:

1. Wong, J. W. C., Fang, M., Li, G. X., & Wong, M. H. (2002). Feasibility of using coal ash residues as co-composting materials for sewage sludge. *Environmental Technology*, 23(10), 1117-1124. <https://doi.org/10.1080/09593332308618312>

2. Chojnacka, K., Moustakas, K., & Witek-Krowiak, A. (2020). Bio-based fertilizers: A practical approach towards circular economy. *Bioresource Technology*, 295, 122223. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122223>
3. Negi, S., Dhar, H., Kumar, S., & Singh, S. (2024). Optimization of anaerobic digestion parameters for enhanced biogas production: A comprehensive review. *Water*, 16(3), 412. <https://doi.org/10.3390/w16030412>
4. Arshad, M., Ali, I., Rasheed, R., Bahadur, S., Ahmad, M., Mahmood, T., & Hussain, A. (2021). Formulation and efficacy testing of bio-organic fertilizer produced through solid-state fermentation of agro-waste by *Burkholderia cenocepacia*. *Microorganisms*, 9(11), 2360. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9112360>
5. Sari, D. K., Hidayat, N., Fajriah, S., & Wijaya, A. (2023). Optimization of fermentation condition to produce liquid organic fertilizer (LOF) from rotten vegetable waste using response surface methodology. *Chemical Engineering and Technology*, 46(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1002/ceat.202200585>
6. Huang, Z., Li, Y., Chen, B., Su, S., & Zhang, W. (2023). Recovery and utilization of waste filtrate from industrial biological fermentation: Development and metabolite profile of the *Bacillus cereus* liquid bio-fertilizer. *Journal of Biotechnology*, 363, 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2023.01.008>
7. Ahmad, I., Zhu, G., Zhou, G., Liu, M., Ahmad, S., Murad, W., Stokes, C. E., Ahmad, A., & Habib, A. (2023). Bio-char particle size coupled with biofertilizer enhances soil carbon-nitrogen microbial pools and CO₂ sequestration in lentil. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1114728. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1114728>
8. Su, C., Liu, K., Zhang, H., Chang, S. X., & Fang, Y. (2025). Heavy metal contamination in organic fertilizers: Risk assessment and temporal trends (2000-2022). *Scientific Reports*, 15, 1355. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85025-1>
9. Vassileva, M., Flor-Peregrin, E., Malusá, E., & Requena, N. E. (2022). Safety level of microorganism-bearing products applied in soil-plant systems. *Frontiers in Plant Science*, 13, 862875. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.862875>
10. Lu, J., Wang, H., Zhang, C., Zhao, G., & Zhang, Q. (2025). Housefly larva bioconversion enhances heavy metal stabilization and antibiotic degradation during chicken manure composting. *Scientific Reports*, 15, 1267. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85267-3>
11. Scarlat, N., Dallemand, J. F., & Fahl, F. (2018). Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, 129, 457-472. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006>
12. Tsyhanenko-Dziubenko, I. Yu., Kireitseva, H. V., & Skyba, H. V. (2025). Prognozuvannia hidro-ekolohichnoho stanu richky Teteriv z vykorystanniam modyfikovanoi modeli Stritera-Felpsa [Prediction of hydroecological state of the Teteriv River using modified Streeter-Phelps model]. *Hidrolohiiia, hidrokhimiiia i hidroekolohiiia* [Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology], 1(75), 53-64. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2025.1.6>
13. Tsyhanenko-Dziubenko, I. Yu., Kireitseva, H. V., Khamdosh, I. N., & Vovk, V. M. (2025). Bibliometrychnyi analiz svitovykh doslidzhen donnykh vidkladiv: tendentsii publikatsii ta napriamy rozvytku sedymentolohii [Bibliometric analysis of global sediment research: Publication trends and development directions in sedimentology]. *Hidrolohiiia, hidrokhimiiia i hidroekolohiiia* [Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology], 2(76), 6-20. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2025.2.1>
14. Kapelista, I., Kireitseva, H., Tsyhanenko-Dziubenko, I., Khomenko, S., & Vovk, V. (2024). Review of innovative approaches for sustainable use of Ukraine's natural resources. *Grassroots Journal of Natural Resources*, 7(3), 378-395. DOI: 10.33002/nr2581.6853.0703ukr19
15. Tsyhanenko-Dziubenko, I., Kireitseva, H., Shomko, O., Gandziura, V., & Khamdosh, I. (2025). Analytical assessment of heavy metals polyelement distribution in urbanized hydroecosystem components: spatial differentiation and migration patterns. *Journal Environmental Problems*, 10(2), 135-144. DOI: 10.23939/ep2025.02.135
16. Tsyhanenko-Dziubenko, I., Kireitseva, H., & Fonseca Araújo, J. (2024). Physiological and biochemical biomarkers of macrophyte resilience to military-related toxic stressors. *Journal Environmental Problems*, 9(4), 227-234. DOI: 10.23939/ep2024.04.227
17. Kireitseva, H., Tsyhanenko-Dziubenko, I., Khomenko, S., & Palii, O. (2025). Integral assessment of the effectiveness of water resource management in communities for sustainable development. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*, 16(1), 27-38. DOI: 10.69628/esbur/1.2025.27
18. Kireitseva, H. V., & Tsyhanenko-Dziubenko, I. Yu. (2025). Ekolohichna otsinka vplyvu viiskovykh dii na hidromerezhu Kyivskoi oblasti ta stratehii vidnovlennia vodnykh ekosystem [Ecological assessment of military actions impact on the hydrographic network of Kyiv region and strategies for aquatic ecosystems restoration]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni admirala Makarova* [Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding], 1(499), 199-207. DOI: 10.15589/znp2025.1(499).28
19. Kireitseva, H. V., Tsyhanenko-Dziubenko, I. Yu., Khomenko, S. V., & Lehenchuk, R. V. (2025). Zastosuvannia bahatovymirnykh statystychnykh metodiv dlia analizu klimatychnykh proektsii [Application of multidimensional statistical methods for climate projections analysis]. *Naukovyi Zhurnal Metinvest Politekhniky. Serii: Tekhnichni nauky* [Scientific Journal of Metinvest Polytechnica. Technical Sciences], 3, 26-33. DOI: 10.32782/3041-2080/2025-3-3
20. Kireitseva, H. V., & Tsyhanenko-Dziubenko, I. Yu. (2025). Antropohenni determinanty dehradatsii hidrokhimichnykh pokaznykiv vodnykh ob'ektiv [Anthropogenic determinants of degradation of hydrochemical indicators of water bodies]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky* [Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences], 349(2), 540-548. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-349-80

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 29.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025

Наукове видання

СЛОБОЖАНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК

Серія: Природничі науки

Науковий журнал

Випуск 2, 2025

Коректура • *Н. Ігнатова*

Комп'ютерна верстка • *Ю. Ковальчук*

Підписано до друку: 31.10.2025 р.
Формат 60x84/8. Times New Roman.
Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 18,6.
Замов. № 1225/950. Наклад 100 прим.

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