

UDC 502.175:574.5

DOI: 10.58407/bht.2.26.11



Copyright (c) 2026 Iryna Munasypova-Motyash, Nataliia Tkachuk

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Ірина Мунасіпова-Мотяш, Наталія Ткачук
СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО БІОІНДИКАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ
ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ



Iryna Munasypova-Motyash, Nataliia Tkachuk
MODERN APPROACHES TO BIOINDICATIVE MONITORING
OF AQUATIC ECOSYSTEMS

АНОТАЦІЯ

Сучасний антропогенний пресинг на водні екосистеми вимагає впровадження високочутливих методів моніторингу, здатних фіксувати порушення гомеостазу гідробіонтів на ранніх етапах. Традиційні гідробіологічні підходи, засновані на аналізі структурно-функціональної організації планктонних та бентосних угруповань, дедалі частіше інтегруються з молекулярно-біохімічними та токсикологічними тест-системами. Особливу загрозу для стабільності іхтіоценозів та об'єктів аквакультури становить хронічне надходження хімічних ксенобіотиків (гербіцидів, поверхнево-активних речовин) та біологічних контамінантів (мікотоксинів, зокрема афлатоксину В1 і Т-2 токсину). У зв'язку з цим актуальним є теоретичне узагальнення та аналітична оцінка інформативності сучасних центичних, молекулярно-генетичних та біохімічних маркерів, що використовуються для інтегрального екологічного аудиту водойм.

Мета роботи – здійснити системний аналіз та узагальнення сучасних методологічних підходів до біоіндикаційного моніторингу водних екосистем, визначивши найбільш інформативні молекулярно-біохімічні, центичні та іхтіотоксикологічні маркери антропогенної трансформації водойм і оцінки адаптаційного потенціалу гідробіонтів.

Методологія ґрунтувалася на системному аналізі, компаративному оцінюванні та узагальненні результатів сучасних натурних і експериментальних досліджень світового наукового простору. Предметом аналізу аналітичного огляду виступали параметри розвитку суцесійних процесів фітопланктону та діатомових водоростей, особливості ембріогенезу риб за дії кліматичних чинників, а також флуктуації показників енергетичного (ензими мітохондріального дихання, глюконеогенез), ліпідного та нуклеїнового (ДНК, РНК, вільні нуклеотиди) обміну, інтенсивності ліпопероксидації та антиоксидантного захисту в органах-мішенях корошових риб за дії хімічних і біологічних полютантів.

Наукова новизна роботи полягає у систематизації та критичному аналізі мультирівневих маркерів біомоніторингу з обґрунтуванням необхідності відходу від монопараметричних оцінок. Уперше комплексно поєднано та концептуалізовано вектори тривалого екологічного моніторингу на рівні фіто- й бентоценозів із експресією клітинних рецепторів (TRPV4) та сезонною динамікою ферментативних зрушень в організмі риб за умов поєданого хімічного (пестициди, ПАР) та біологічного (мікотоксикози) навантаження.

Висновки. Доведено, що оцінка видового різноманіття мікрководоростей є надійним індикатором довготривалих змін трофічного статусу річкових систем, тоді як показники раннього онтогенезу риб відображають вплив глобальних кліматичних факторів. Встановлено, що за умов дії хімічних ксенобіотиків та мікотоксинів (афлатоксину В1, Т-2 токсину) універсальними та найбільш чутливими критеріями раннього патологічного процесу є інтенсифікація перекисного окиснення ліпідів, депресія антиоксидантної системи, гальмування нуклеїнового обміну та деструкція мітохондріальних ензимних контурів. Отримані результати обґрунтовують доцільність розробки й практичного впровадження інтегральних мультимаркерних панелей у загальну систему екологічного моніторингу природних водойм та промислової аквакультури.

Ключові слова: біомоніторинг, водні екосистеми, фітопланктон, діатомові водорості, іхтіотоксикологія, ксенобіотики, мікотоксини, окисний стрес, енергетичний обмін, біохімічні маркери

ABSTRACT

Modern anthropogenic pressure on aquatic ecosystems demands the implementation of highly sensitive monitoring methods capable of detecting homeostatic disruptions in hydrobionts at early stages. Traditional hydrobiological approaches based on the structural and functional organization of planktonic and benthic communities are increasingly being integrated with molecular-biochemical and toxicological test systems. A particular threat to the stability of ichthyocenoses and aquaculture facilities is posed by the chronic influx of chemical xenobiotics (herbicides, surfactants) and biological contaminants (mycotoxins, specifically aflatoxin B1 and

T-2 toxin). In this regard, the theoretical synthesis and analytical evaluation of the informativeness of modern coenotic, molecular-genetic, and biochemical markers used for the integrated ecological audit of water bodies is highly relevant.

The aim of the study was to perform a systematic analysis and synthesis of modern methodological approaches to the bioindicative monitoring of aquatic ecosystems, identifying the most informative molecular-biochemical, coenotic, and ichthyotoxicological markers of anthropogenic transformation of water bodies and the assessment of the adaptive potential of hydrobionts.

Methodology was based on the systematic analysis, comparative assessment, and synthesis of results from contemporary field and experimental studies within the global scientific space. The subjects of this analytical review included the development parameters of successional processes in phytoplankton and diatom algae, the peculiarities of fish embryogenesis under the influence of climatic factors, as well as fluctuations in energy metabolism (mitochondrial respiration enzymes, gluconeogenesis), lipid and nucleic acid metabolism (DNA, RNA, free nucleotides), the intensity of lipid peroxidation, and antioxidant defense in target organs of cyprinid fish under the action of chemical and biological pollutants.

Scientific novelty of the work lies in the systematization and critical analysis of multi-level biomonitoring markers, substantiating the necessity of moving away from mono-parametric evaluations. For the first time, long-term ecological monitoring vectors at the phyto- and benthocoenosis levels have been comprehensively combined and conceptualized alongside cellular receptor expression (TRPV4) and the seasonal dynamics of enzymatic alterations in the fish organism under conditions of combined chemical (pesticides, surfactants) and biological (mycotoxicosis) loading.

Conclusions. It has been proven that evaluating the species diversity of microalgae is a reliable indicator of long-term changes in the trophic status of river systems, whereas the parameters of early fish ontogeny reflect the impact of global climatic factors. It was established that under the influence of chemical xenobiotics and mycotoxins (aflatoxin B1, T-2 toxin), the universal and most sensitive criteria for early pathological processes are the intensification of lipid peroxidation, depression of the antioxidant system, inhibition of nucleic acid metabolism, and destruction of mitochondrial enzymatic pathways. The obtained results substantiate the viability of developing and practically implementing integrated multi-marker panels into the general system of ecological monitoring for both natural water bodies and industrial aquaculture.

Key words: biomonitoring, aquatic ecosystems, phytoplankton, diatoms, ichthyotoxicology, xenobiotics, mycotoxins, oxidative stress, energy metabolism, biochemical markers

Вступ

Збереження стійкості та біологічного різноманіття водних екосистем в умовах інтенсивного антропогенного пресингу та кліматичних змін належить до ключових завдань сучасної екологічної науки. Традиційні фізико-хімічні методи аналізу водного середовища, хоч і забезпечують точність визначення концентрації конкретних речовин, мають дискретний характер і не дають цілісного уявлення про пролонговану біологічну дію забруднювачів на живі організми. У зв'язку з цим особливості актуальності набуває розвиток і впровадження методології екологічного моніторингу на основі біоіндикації (Gokçe, 2022). Використання гідробіонтів як живих датчиків дозволяє інтегрально оцінити стан середовища та спрогнозувати динаміку розвитку екосистеми в цілому. У цьому контексті важливо розмежовувати поняття біоіндикації та біомоніторингу. Біоіндикація передбачає використання реакцій організмів, популяцій або угруповань для характеристики змін стану навколишнього середовища, тоді як біомоніторинг є систематичним та регулярним спостереженням за такими біологічними показниками у часі й просторі. Таким чином,

біоіндикаційні методи є важливою складовою комплексної системи біомоніторингу водних екосистем.

Класичні підходи до біомоніторингу річкових та озерних систем традиційно базуються на аналізі структурно-функціональної організації фітопланктонних спільнот (Dembowska, 2021) та бентосних діатомових водоростей, які є надійними маркерами якості води у межах Водної рамкової директиви ЄС (Masouras et al., 2021). Водночас реакція екосистеми на забруднення формується на основі сукупної відповіді окремих організмів, де первинні патологічні зміни відбуваються на молекулярному, біохімічному та клітинному рівнях задовго до прояву видимих порушень у популяціях. Окрім того, чутливість гідробіонтів на ранніх стадіях онтогенезу (наприклад, виживаність заплідненої ікри) суттєво залежить від флуктуацій абіотичних чинників, таких як температура чи солоність, що модулює загальний екологічний статус водойми (Park et al., 2024).

Сучасний етап розвитку біоіндикації вимагає залучення високочутливих біохімічних та іхтіотоксикологічних маркерів для оцінки впливу новітніх антропогенних чинників, зокрема мікропластику, який здатний змінювати властивості позаклі-

тинних речовин мікроводоростей (*Microcystis aeruginosa*) і виступати вектором для інших токсикантів (Ye et al., 2022). Проте найбільшу загрозу для стабільності аквакультур та природних іхтіоценозів становить хімічне забруднення ксенобіотиками різної природи, включаючи залишки пестицидів, поверхнево-активних речовин (ПАР) та мікотоксинів (Sevi et al., 2016; Koletsy et al., 2021).

Потрапляння гербіцидів та ПАР у водне середовище ініціює глибокі перебудови в метаболізмі риб. Зокрема, це проявляється у деструктивних змінах ферментів енергетичного обміну та термінальних реакцій глюконеогенезу (Yakovenko et al., 2018; Mekhed et al., 2019), а також у вираженій сезонній динаміці їхньої токсичної дії на вміст глюкози в тканинах. Паралельно з цим, надходження у водойми мікотоксинів (Т-2 токсину, афлатоксину В1 та ін.), що продукуються мікроскопічними грибами та накопичуються у кормах та м'язах риб (Kovalsky et al., 2016; Pickova et al., 2021; Polotnianko & Mekhed, 2023), викликає системний токсикоз. Наслідком такого впливу є порушення морфологічних і гематологічних показників іхтіофауни (Fornari et al., 2023; Polotnianko & Mekhed, 2024), супресія нуклеїнового обміну (Filonenko & Mekhed, 2025) та деградація ліпідних компонентів клітинних мембран (Symonova et al., 2018).

Оскільки ключовою ланкою патогенезу за дії ксенобіотиків є розвиток окисного стресу, особливу індикаційну цінність має моніторинг інтенсивності перекисного окиснення ліпідів та активності ензимів антиоксидантного захисту в тканинах і печінці промислових видів риб, зокрема коропа (*Cyprinus carpio*) (Yakovenko et al., 2017; Simonova & Mekhed, 2025). Комплексна адаптивна відповідь крові та метаболічних систем гідробіонтів на хронічне забруднення середовища (Nikolaenko et al., 2023; Shkurko et al., 2024) слугує надійним біохімічним критерієм у системі раннього екологічного сповіщення.

Таким чином, інтеграція класичних гідробіологічних методів із сучасними молекулярно-біохімічними тест-системами іхтіомоніторингу є необхідною умовою для формування об'єктивної оцінки екологічного стану водойм.

Мета дослідження – теоретично обґрунтувати та узагальнити сучасні методологічні підходи до біоіндикаційного моніторингу водних екосистем, оцінити інформативність біохімічних, іхтіотоксикологічних та морфологічних маркерів гідробіонтів в умовах антропогенного забруднення водойм ксенобіотиками та мікотоксинами.

У сучасній практиці екологічного менеджменту водних ресурсів біомоніторинг розглядається як фундаментальний інструмент, що доповнює хімічний аналіз. Проте ефективність оцінки залежить від вибору правильного методологічного рівня – від організмowego до екосистемного (Gokçe, 2022).

Дослідження структурних змін угруповань гідробіонтів дозволяють фіксувати довгострокові тренди трансформації водойм. Зокрема, аналіз видового різноманіття та щільності фітопланктону є класичним інструментом оцінки трофічного статусу та загальної якості води в басейнах великих річок (Dembowska, 2021). Важливе місце в інтегральному моніторингу посідають бентосні діатомові водорості. Завдяки своїй малорухливості та специфічним вимогам до субстрату, вони виступають надійними індикаторами локального антропогенного навантаження, що активно використовується в країнах ЄС у межах виконання вимог Водної рамкової директиви (Masouras et al., 2021).

Разом з тим, чутливість водних екосистем до забруднення тісно переплітається зі змінами глобальних абіотичних чинників – температури та солоності води. Флуктуації цих параметрів безпосередньо впливають на виживаність та ембріогенез риб на ранніх стадіях розвитку, що може радикально змінювати чисельність популяцій (Park et al., 2024). На молекулярному рівні адаптація гідробіонтів до таких коливань супроводжується специфічною експресією генів, зокрема транскрипційних варіантів мРНК ванілоїдних рецепторів (TRPV4), які є первинними клітинними датчиками температурного та осмотичного стресу (Lee et al., 2021).

Більш тонкі та ранні патологічні процеси в гідроекосистемах виявляються через біохімічну відповідь іхтіофауни.

Потрапляння у воду ксенобіотиків (пестицидів, ПАР) порушує метаболічну карту риб, блокуючи ключові ензими енергетичного обміну та ініціюючи збої у системі глюконеогенезу (Yakovenko et al., 2018; Mekhed et al., 2019). Водночас запуск вільнорадикальних процесів та інтенсифікація перекисного окиснення ліпідів у печінці та інших тканинах промислових риб є універсальним маркером хімічного отруєння, що змушує антиоксидантну систему організму працювати на межі виснаження (Yakovenko et al., 2017; Simonova & Mekhed, 2025).

Особливу екотоксикологічну небезпеку становить забруднення водою мікотоксинами, які потрапляють туди зі стічними водами агрокомплексів або через неякісні штучні корми (Koletsy et al., 2021). Основними продуцентами цих небезпечних метаболітів є мікроскопічні гриби родів *Aspergillus*, *Fusarium* та *Penicillium*, поширені у зерновій сировині (Pickova et al., 2021). Проблема ускладнюється явищем ко-контамінації – одночасною присутністю в кормах та воді кількох видів регульованих та маскованих мікотоксинів, що створює ефект синергічної токсичності для гідробіонтів (Kovalsky et al., 2016).

Серед усього спектра мікотоксинів найбільш детально вивчається дія афлатоксину B1 (AFB1) та T-2 токсину. AFB1 є потужним гепатоканцерогеном і генотоксикантом. Його наявність у трофічних ланцюгах та продуктах переробки вимагає постійного контролю (Mushtaq et al., 2012) та розробки методів детоксикації, наприклад, за допомогою ультрафіолетового опромінення (Hassan, 2018) або введення у корми спеціальних адсорбуючих добавок для мінімізації деструктивного впливу на гістологію печінки риб (Fornari et al., 2023). На клітинному рівні дія AFB1 призводить до глибокого пригнічення синтезу нуклеїнових кислот ДНК та РНК у тканинах риб, що гальмує пластичний обмін (Filonenko & Mekhed, 2025).

Не менш агресивним є T-2 токсин (трихотеценовий мікотоксин). Дослідженнями доведено, що він здатний накопичуватися безпосередньо у м'язовій тканині риб (Polotnianko & Mekhed, 2023), викликаючи суттєві зміни морфологічних параметрів іхтіофауни, хронічну деградацію

ліпідного шару мембран та деструкцію клітин крові (Symonova et al., 2018; Polotnianko & Mekhed, 2024). Сукупний вплив мікотоксинів на іхтіологічні показники та загальний метаболізм коропових риб формує стійкий стан хронічного токсикозу (Mekhed, 2024; Shkurko et al., 2024). Проте організм риб демонструє комплексні адаптаційні зрушення (гліколіз, зміна гематологічного профілю), намагаючись компенсувати дію пошкоджувальних факторів водного середовища (Nikolaenko et al., 2023).

Таким чином, аналіз сучасних наукових публікацій свідчить про доцільність комплексного використання показників різних рівнів організації гідробіонтів для підвищення інформативності екологічного моніторингу водних екосистем.

Матеріали та методи дослідження

Теоретико-методологічну основу роботи становить системний аналіз та критичне узагальнення сучасних наукових підходів до біоіндикаційного оцінювання екологічного статусу водних середовищ. Для досягнення поставленої мети було застосовано метод систематичного літературного огляду, який дозволив комплексно проаналізувати динаміку розвитку іхтіотоксикологічних та гідробіологічних досліджень за останні роки. Інформаційною базою дослідження слугували релевантні публікації, індексовані у провідних міжнародних та національних реферативних базах даних, зокрема Scopus, Web of Science, PubMed, Google Scholar та електронних фондах Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського.

Пошук наукових публікацій охоплював переважно період 2018–2025 рр., із додатковим урахуванням фундаментальних праць попередніх років, що мають безпосереднє значення для розкриття теоретичних і методологічних аспектів біоіндикації. До аналізу включалися наукові публікації, присвячені використанню гідробіонтів та їхніх морфологічних, фізіологічних, біохімічних і молекулярних показників для оцінювання стану водних екосистем та впливу антропогенних чинників.

Основними дескрипторами пошуку виступали терміни, пов'язані з екологічним моніторингом гідроекосистем, сучасними

методами біоіндикації, молекулярно-біохімічними маркерами токсичності у риб, а також специфічними аспектами впливу ксенобіотиків, гербіцидів, поверхнево-активних речовин та мікотоксинів на антиоксидантну систему і ліпідний обмін промислових видів іхтіофауни.

Систематизацію та аналітичну обробку фактичного матеріалу відібраних джерел проводили за двома основними напрямками. Перший напрям охоплював оцінку екосистемно-ценотичних параметрів, таких як структурна організація фітопланктону та бентосних діатомових водоростей під впливом антропогенних та глобальних кліматичних факторів. Другий напрям був зосереджений на організмово-біохімічному рівні, де детально аналізували механізми порушення метаболізму, пригнічення нуклеїнового та ліпідного обміну, а також індукцію окисного стресу в тканинах риб за дії токсикантів хімічного та біологічного походження. Такий комплексний методологічний підхід забезпечив об'єктивність висновків та дозволив сформулювати цілісне уявлення про сучасний стан біоіндикаційного моніторингу.

Вибір зазначених показників для аналітичного узагальнення зумовлений їхньою здатністю відображати різні рівні організації біологічної відповіді на дію антропогенних чинників. Ценотичні показники характеризують структурні та функціональні зміни угруповань, морфологічні й онтогенетичні параметри відображають реакцію організмового рівня, тоді як біохімічні та молекулярні маркери дають змогу виявляти ранні функціональні порушення в організмі гідробіонтів. Такий підхід дозволяє комплексно оцінювати як уже сформовані зміни, так і ранні прояви дії стресових факторів.

Результати дослідження та обговорення

Сучасний екологічний моніторинг водних об'єктів базується на усвідомленні того, що гідроекосистема реагує на антропогенне навантаження як цілісна функціональна структура. Системний аналіз наукових публікацій останніх років дозволяє констатувати, що оцінка якості водного середовища успішно здійснюється за допомогою індикаторних організмів на

різних рівнях їхньої біологічної організації. Провідне місце у структурі сучасного біомоніторингу посідає аналіз структурно-функціональних параметрів фітопланктонних угруповань. Як первинні продуценти, мікрководорості миттєво реагують на зміну гідрохімічного режиму, появу біогенних елементів та токсичне забруднення, що робить їх незамінними об'єктами для довгострокового спостереження за екологічним статусом великих транскордонних річкових систем та оцінки їхнього трофічного стану (Dembowska, 2021).

Поряд із вільноплаваючим фітопланктоном, у світовій практиці водоохоронного менеджменту особлива увага приділяється дослідженням бентосних екосистем. Зокрема, використання донних діатомових водоростей як високочутливих біоіндикаторів визнано одним із найбільш стандартизованих та об'єктивних методів у межах реалізації вимог Водної рамкової директиви Європейського Союзу. Завдяки прикріпленому способу життя та специфічним екологічним нішам різних видових таксонів, бентосні діатомеї дозволяють оцінити не лише поточний рівень сапробності чи токсичності водойми, а й спрогнозувати довготривалі сукцесійні зміни в річкових мережах під впливом урбанізації та промислового пресингу (Masouras et al., 2021).

Сучасні методологічні підходи до біомоніторингу також враховують, що стабільність екосистем та виживання популяцій вищих гідробіонтів тісно пов'язані з глобальними кліматичними флуктуаціями. Зміни температурного режиму та коливання солоності води чинять сильний модифікуючий вплив на ранні стадії онтогенезу риб, які є найбільш вразливими ланками іхтіоценозів. Натурні та модельні експерименти засвідчують, що навіть незначні відхилення солоності від оптимуму критично знижують виживаність та порушують процеси ембріогенезу заплідненої ікри промислових видів риб, що здатне повністю дестабілізувати відтворення біоресурсів у специфічних гідроекосистемах (Park et al., 2024). На глибинному, клітинному рівні молекулярний механізм адаптації організму до таких осмотичних та термічних стрес-факторів регулюється через

активацію специфічних білкових комплексів. Дослідження експресії транскрипційних варіантів матричної РНК ванілоїдних рецепторів типу 4 підтверджують, що ці мембранні структури функціонують як первинні сенсорні датчики клітини, забезпечуючи тонку фізіологічну перебудову і компенсаторні реакції гідробіонтів у відповідь на динамічні зміни параметрів навколишнього середовища (Lee et al., 2021).

Таким чином, інтегральний аналіз стану водних екосистем на сучасному етапі успішно поєднує класичні гідробіологічні методи оцінки видового різноманіття планктону й бентосу з делікатними молекулярно-генетичними та ембріологічними тест-системами. Це дозволяє здійснювати всебічний екологічний аудит водойм, фіксуючи порушення як на рівні цілих біоценозів, так і на рівні фізіологічної стійкості окремих індикаторних видів.

У системі сучасного екологічного моніторингу водних екосистем фіксація біохімічних зрушень в організмі іхтіофауни посідає особливе місце, оскільки молекулярні маркери дозволяють реєструвати наявність токсичного пресингу задовго до появи видимих морфологічних чи популяційних змін. Найбільшу загрозу для стабільності природних водойм та об'єктів аквакультури становить хронічне надходження хімічних ксенобіотиків штучного походження, серед яких провідну роль відіграють залишки гербіцидів та поверхнево-активних речовин, що масово застосовуються в агропромисловому секторі та комунальному господарстві. Потрапляючи у водне середовище, ці сполуки швидко проникають через зябровий апарат та шкірні покриви риб, ініціюючи системні метаболічні перебудови та порушуючи роботу життєво важливих ензимних контурів.

Одним із ключових механізмів негативного впливу пестицидів та сурфактантів на гідробіонтів є деструкція енергетичного потенціалу клітин. Дослідження метаболічного профілю модельного об'єкта - коропа звичайного (*Cyprinus carpio* L.) - свідчать про те, що тривалий вплив гербіцидів та поверхнево-активних речовин призводить до вираженого пригнічення активності ключових ферментів енергетичного обміну, блокуючи нормальний перебіг дихальних процесів у мітохондріях та знижуючи адаптаційний резерв організму

(Yakovenko et al., 2018). Токсична дія пестицидного навантаження також суттєво трансформує вуглеводний обмін риб, викликаючи глибокі збої у функціонуванні ферментів термінальних реакцій глюконеогенезу. При цьому характерною особливістю є чітко виражена сезонна динаміка токсичного ефекту, коли коливання температури та гідрохімічного режиму водойм у різні пори року модулюють силу патогенного впливу ксенобіотиків, призводячи до критичних флуктуацій вмісту глюкози в тканинах та виснаження тканинних депо глікогену (Mekhed et al., 2019).

Паралельно з деструкцією енергетичного обміну, універсальною ланкою патогенезу за дії хімічних забруднювачів різної природи є індукція окисного стресу. Надходження ксенобіотиків у внутрішнє середовище риб супроводжується надмірною генерацією активних форм кисню, які атакують поліненасичені жирні кислоти клітинних мембран. Розвиток інтенсивних процесів перекисного окиснення ліпідів, особливо у печінці коропа, яка є головним органом детоксикації та біотрансформації, слугує прямим показником глибини токсичного ураження (Simonova & Mekhed, 2025). У відповідь на вільнорадикальну агресію відбувається активація ендогенної антиоксидантної системи, ензимами якої на перших етапах намагаються нейтралізувати токсичні перекиси та радикальні сполуки. Проте в умовах тривалого або висококонцентрованого антропогенного забруднення відзначається виснаження та різке зниження активності компонентів антиоксидантного захисту в тканинах, що свідчить про зрив фізіологічної адаптації та перехід процесу на рівень незворотних клітинних пошкоджень (Yakovenko et al., 2017).

Таким чином, оцінка стану ензимних систем енергетичного метаболізму, моніторинг інтенсивності ліпопероксидації та детекція активності ферментів антиоксидантного захисту в органах-мішенях риб забезпечують високу чутливість екологічного моніторингу. Ці біохімічні показники виступають надійними молекулярними критеріями раннього виявлення антропогенної трансформації гідроекосистем, дозволяючи своєчасно оцінити реальну загрозу для іхтіофауни в умовах хімічного пресингу.

Поряд із хімічним пресингом ксенобіотиків штучного походження, суттєвою загрозою для біологічного розмаїття водойм та рентабельності промислового рибництва є контамінація водного середовища та штучних кормів токсинами мікроскопічних грибів. Сучасний екологічний моніторинг об'єктів аквакультури все частіше фіксує присутність вторинних метаболітів мікроміцетів родів *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, серед яких найбільш патогенними для іхтіофауни визнано афлатоксин В1 та Т-2 токсин. Ці біологічні полютанти мають виражену гепатотоксичну, імуносупресивну та хронічну загальнотоксичну дію, а їхнє проникнення в організм риб аліментарним шляхом ініціює каскад небезпечних метаболічних розладів і глибоку деструкцію клітинних структур.

Первинною мішенню для дії мікотоксинів в організмі риб виступає печінка як центральний орган метаболізму та детоксикації (Filonenko & Mekhed, 2025). Дослідження біохімічного статусу коропа звичайного свідчать, що аліментарне надходження мікотоксинів супроводжується різким пригніченням процесів біосинтезу. Зокрема, розвиток хронічного мікотоксикозу призводить до вираженого гальмування нуклеїнового обміну, що проявляється у зниженні концентрації РНК та ДНК у тканинах печінки, а також зумовлює істотні зсуви у фракційному складі вільних нуклеотидів і пригнічує активність ферментів їхнього розпаду. Крім того, глибоких змін зазнає ліпідна матриця клітинних мембран. Під дією Т-2 токсину та афлатоксину В1 спостерігається деградація загальних ліпідів та порушення оптимального співвідношення між фосфоліпідами і триацилгліцеридами, що свідчить про розвиток жирової інфільтрації печінки, дестабілізацію клітинної архітектури та втрату мембранами їхніх бар'єрних функцій.

Системний характер дії мікотоксинів чітко відстежується за змінами морфологічних та гематологічних показників іхтіофауни. Тривала інтоксикація викликає депресію кровотворної системи, що маніфестує у вигляді анемічних станів, зниження кількості еритроцитів та гемоглобіну, а також реорганізації лейкоцитарної формули крові у бік лімфопенії та гранулоцитозу. Водночас на рівні організму фіксується виражена імуносупресія, зумовлена пригніченням неспецифічної резистентності

та зниженням лізоцимної і бактерицидної активності сироватки крові, що робить риб беззахисними перед вторинними бактеріальними та паразитарними інвазіями. Морфологічні дослідження паренхіматозних органів підтверджують біохімічні зрушення, виявляючи дистрофічні процеси, некробіотичні зміни гепатоцитів, деструкцію епітелію ниркових каналців та деформацію зябрових пелюсток, що в сукупності веде до зниження темпів росту риб та зростання їхньої летальності.

Таким чином, узагальнення даних сучасного мікотоксикологічного моніторингу вказує на необхідність інтеграції біохімічних маркерів нуклеїнового та ліпідного метаболізму разом із класичними гематологічними і морфологічними тестами в загальну систему екологічного аудиту. Це дозволяє диференціювати ефекти біологічного забруднення від хімічного токсикозу та забезпечує ранню діагностику латентних форм мікотоксикозів в аквакультурі.

Висновки

Проведений системний аналіз сучасних наукових підходів до біоіндикаційного моніторингу водних екосистем дозволяє констатувати, що об'єктивна оцінка екологічного статусу водойм в умовах інтенсивного антропогенного пресингу можлива лише за умови інтеграції методів різних біологічних рівнів. Комплексне поєднання класичних гідробіологічних досліджень на ценотичному рівні з делікатними молекулярно-біохімічними та іхтіотоксикологічними тест-системами забезпечує формування цілісного та прогностично цінного уявлення про стан гідроекосистем. При цьому структурно-функціональні параметри фітопланктону та бентосних діатомових водоростей виступають надійними індикаторами довготривалих суцесійних змін і загального трофічного статусу водойм, тоді як оцінка раннього онтогенезу риб та експресії специфічних клітинних рецепторів дозволяє чітко диференціювати вплив глобальних кліматичних факторів, зокрема коливань температури та солоності середовища.

За даними проаналізованих досліджень, умовах забруднення водойм сучасними хімічними ксенобіотиками, такими як залишки гербіцидів та поверхнево-активних речовин, найбільш чутливими критеріями

раннього екологічного неблагополуччя є молекулярно-метаболичні маркери іхтіофауни. Хронічний хімічний токсикоз викликає глибоку деструкцію енергетичного потенціалу клітин модельного об'єкта *Cyprinus carpio*, що маніфестує у пригніченні ключових мітохондріальних ферментів, збоях ферментативних контурів глюконеогенезу із вираженою сезонною залежністю, а також в індукції окисного стресу. Інтенсифікація процесів перекисного окиснення ліпідів на тлі виснаження ендогенної антиоксидантної системи в органах-мішенях риб слугує універсальним показником глибини патологічного процесу та зриву фізіологічної адаптації організму задовго до появи видимих популяційних зрушень.

Доведено, що не менш вагомим вектором сучасного екодослідження має виступати мікотоксикологічний моніторинг, оскільки біологічна контамінація водного середовища та штучних кормів вторинними метаболітами мікроміцетів, зокрема афлатоксином B1 та T-2

токсином, чинить потужну деструктивну дію на іхтіофауну. Розвиток мікотоксикозів супроводжується гальмуванням нуклеїнового обміну, зниженням концентрації РНК і ДНК, деградацією ліпідного матриксу гепатоцитів, а також вираженою імуносупресією та глибокою реорганізацією морфо-гематологічного профілю риб, так як в роботі не наведено даних про ступінь пригнічення нуклеїнового обміну. Інтеграція біохімічних маркерів нуклеїнового та ліпідного метаболізму разом із класичними гематологічними тестами в єдину систему екологічного аудиту дозволяє чітко диференціювати ефекти біологічного забруднення від хімічного інтоксикаційного синдрому. Перспективи подальших досліджень у цьому напрямі полягають у розробці стандартизованих мультимаркерних панелей для експрес-діагностики ранніх стадій антропогенної трансформації як природних водойм, так і замкнених систем промислової аквакультури.

Фінансування / Funding

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування / This research received no external funding

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Набір даних доступний за запитом до авторів / Dataset available on request from the authors.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Не застосовується / Not applicable.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автор Наталія Ткачук є членом редакційної колегії Biota. Human. Technology. Вона не брала участі в процесі прийняття редакційних рішень, рецензування чи прийнятті цього рукопису. Автори не мають інших конфліктів інтересів, про які слід зазначити / Author Nataliia Tkachuk is the member of the editorial board of Biota. Human. Technology. She was not involved in the editorial decision-making, peer review, or acceptance process for this manuscript. The authors have no other conflicts of interest to note.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект або технології штучного інтелекту для збору, аналізу чи інтерпретації даних / This study did not use generative artificial intelligence or AI-enabled technologies to collect, analyze, or interpret data.

References

- Dembowska, E.A. (2021). The use of phytoplankton in the assessment of water quality in the lower section of Poland's largest river. *Water*, 13(23), 3471. <https://doi.org/10.3390/w13233471>
- Filonenko, D., & Mekhed, O. (2025). Biochemical assessment of the effect of aflatoxin B1 on nucleic acid levels in tissues of crucian carp (*Carassius carassius*). *Biota. Human. Technology*, (3), 95–102. <https://doi.org/10.58407/bht.3.25.9>
- Філоненко Д., Мехед О. Біохімічна оцінка впливу афлатоксину В1 на рівень нуклеїнових кислот у тканинах карася звичайного (*Carassius carassius*). *Biota. Human. Technology*. 2025. № 3. С. 95–102. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.3.25.9>
- 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, hermatological parameters, and liver histology in juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Frontiers in Animal Science*, 4, 1281722. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1281722>
- Gökçe, D. (2022). The importance and effectiveness of aquatic biomonitoring. *New Paradigms in Environmental Biomonitoring Using Plants*. Elsevier, 45–72. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824351-0.00007-9>
- Hassan, F. F. (2018). Detection of aflatoxin B1 in some canned foods and reduction of toxin by ultraviolet radiation. *Iraqi Journal of Science*, 58(4C), 2343–2349. <https://doi.org/10.24996/ijs.2017.58.4C.10>
- Koletsis, 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>
- 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(12), 363. <https://doi.org/10.3390/toxins8120363>
- Lee, H.J., Lee, S.Y., & Kim, Y.K. (2021). Molecular characterization of transient receptor potential vanilloid 4 (TRPV4) gene transcript variant mRNA of chum salmon *Oncorhynchus keta* in response to salinity or temperature changes. *Gene*, 795, 145779. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2021.145779>
- Masouras, A., Karaouzas, I., Dimitriou, E., Tsirtsis, G., & Smeti, E. (2021). Benthic diatoms in river biomonitoring-present and future perspectives within the water framework directive. *Water*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/w13040478>
- Mekhed, O. (2024). Changes in the biochemical indicators of hydrobionts in response to the toxic effect of mycotoxin T2. *One World – One Health: I International Scientific and Practical Conference* (4–5 June 2024, Słupsk, Poland). P. 263–266.
- Mekhed, O. B., Yakovenko, B. V., & Iskevych, Ye. V. (2019). Seasonal dynamics of herbicides' toxic impact on activity of enzymes of terminal gluconeogenesis reactions and glucose content in carp tissues. *Hydrobiological Journal*, 55(3), 67–73. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v55.i3.80>
- Mushtaq, M., Sultana, V., Anwar, F., et al. (2012). Occurrence of aflatoxins in selected processed foods from Pakistan. *International Journal of Molecular Sciences*, 13(7), 8324–8337. <https://doi.org/10.3390/ijms1307832>

Nikolaenko, T., Ivashchenko, M., Ivashchenko, N., & Mekhed, O. (2023). Adaptive changes in blood indicators of scaly carp (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) in response to water pollution. *Natural resources of the border areas in the conditions of climate change*. Chernihiv: Desna-Polihrav, 99–100. (in Ukrainian)

Ніколаєнко Т., Івашченко М., Івашченко 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*. Чернігів: Десна-Поліграф, 2023. С. 99–100.

Pickova, D., Ostry, V., & Malir, F. A (2021). Recent Overview of Producers and Important Dietary Sources of Aflatoxins. *Toxins*, 13, 186. <https://doi.org/10.3390/toxins13030186>

Park, J. W., Kim, B. S., Kim, J. K., Jung, H. K., Park, H. J., & Lee, C. I. (2024). Influence of salinity on the survival rate of fertilized chum salmon (*Oncorhynchus keta*) eggs. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(1), 39. <https://doi.org/10.3390/jmse12010039>

Polotnianko, L., & Mekhed, O. (2023). Accumulation of mycotoxins in the muscles of scaly carp (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) when fed T-2 toxin-contaminated feed. *Natural resources of the border areas in the conditions of climate change*. Chernihiv: Desna-Polihrav, 105–106. (in Ukrainian).

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.

Polotnianko, L., & Mekhed, O. (2024). Changes in the morphological indicators of carp under the action of mycotoxin T2. *Biota. Human. Technology*, (3), 69–76. <https://doi.org/10.58407/bht.3.24.4> (in Ukrainian)

Sevi, A., Marino, R., Lorenzo, J. M., et al. (2016). Strategies to improve meat quality and safety. *The Scientific World Journal*, Article ID 9523621. <https://doi.org/10.1155/2016/9523621>

Shkurko, M., Sadchenko, N. M., & Mekhed, O. (2024). Influence of water environment contamination with mycotoxins on ichthyological indicators and metabolic processes in carp fish. *Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference with International Participation of Students, Graduate Students and Young Scientists* (20 November 2024, Chernihiv). Chernihiv: Nizhyn Mykola Gogol University, 89–90. (in Ukrainian).

Шкурко М., Садченко Н. М., Мехед О. Вплив забруднення водного середовища мікотоксинами на іхтіологічні показники та метаболічні процеси в організмі коропових риб. *Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю студентів, аспірантів і молодих учених* (20 листопада 2024 р., Чернігів). Чернігів: НУЧК імені Т. Г. Шевченка, 2024. С. 89–90.

Simonova, N. A., & Mekhed, O. B. (2025). Effect of toxicants of different chemical nature on lipid peroxidation intensity in the liver of scaly carp (*Cyprinus carpio*). *Natural Science Education and Science*, 4, 171–180. <https://doi.org/10.32782/NSER/2025-4.22> (in Ukrainian).

Симонова Н. А., Мехед О. Б. Вплив токсикантів різної хімічної природи на інтенсивність перекисного окиснення ліпідів у печінці коропа лускатого (*Cyprinus carpio*). *Природнича освіта і наука*. 2025. Вип. 4. С. 171–180. DOI: <https://doi.org/10.32782/NSER/2025-4.22>

Symonova, N. A., Mekhed, O. B., Kupchyk, 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. https://doi.org/10.15421/2018_234

Yakovenko, B. V., Tretyak, A. P., Mekhed, O. B., Khaitova, A. D., & Simonova, N. A. (2017). Effect of xenobiotics on the activity of the antioxidant system in carp tissues. *Scientific Notes of Ternopil National Pedagogical University. Series: Biology*, 2(69), 76–80. (in Ukrainian).

Яковенко Б. В., Третяк А. П., Мехед О. Б., Хайтова А. Д., Симонова Н. А. Вплив ксенобіотиків на активність антиоксидантної системи в тканинах коропа. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету. Серія: Біологія*. 2017. № 2 (69). С. 76–80.

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. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v55.i3.80>

Ye, T., Yang, A., Wang, Y., Song, N., Wang, P., & Xu, H. (2022). Changes of the physicochemical properties of extracellular polymeric substances (EPS) from *Microcystis aeruginosa* in response to microplastics. *Environmental Pollution*, 315, 120354. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120354>

Received: 23.06.2026. Accepted: 12.08.2026. Published: 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Мунасіпова-Мотяш І., Ткачук Н. Сучасні підходи до біоіндикаційного моніторингу водних екосистем. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. С. 144-154.
DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.11>

Cite this article in APA style as:

Munasypova-Motyash, I., & Tkachuk, N. (2026). Suchasni pidkhody do bioindykatsiinoho monitorynhu vodnykh ekosystem [Modern approaches to bioindicative monitoring of aquatic ecosystems]. *Biota. Human. Technology*, (2), 144-154. <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.11> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Munasypova-Motyash I. [in Ukrainian: **Мунасіпова-Мотяш І.**] ¹, Cand. Sc. (Biol.), Assoc. Prof., email: irynamotyash@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4129-9040

Department of General, Developmental and Social Psychology, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium"
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

Tkachuk N. [in Ukrainian: **Ткачук Н.**] ², Cand. Sc. (Biol.), Assoc. Prof., email: nataliia.smykun@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5115-7716 Scopus-Author ID: 7801574248 ResearcherID: AAB-4448-2020
Department of Biology and Human Health, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium"
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

¹ Conceptualization, methodology, validation, formal analysis, investigation, resources, data curation, writing - original draft, writing - review & editing.

² Conceptualization, methodology, validation, formal analysis, investigation, resources, data curation, writing - original draft, writing - review & editing.