

## БІОІНДИКАЦІЯ СТАНУ ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ У КОНТЕКСТІ ЕКОЛОГІЧНОЇ ТОКСИКОЛОГІЇ

**ФЕДОРЧУК І.В.** – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри біології та екології  
*orcid.org/0000-0002-4669-6133*

Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка

**КОЗАК М.І.** – кандидат біологічних наук, доцент кафедри біології та екології  
*orcid.org/0000-0002-2734-6410*

Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка

**КОНДРАТЮК А.** – аспірант  
*orcid.org/0009-0006-5096-2584*

Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка

**Постановка проблеми.** Водні екосистеми залишаються одними з найчутливіших природних систем до антропогенного навантаження, оскільки саме у водоймах акумулюються метали, пестициди, нафтопродукти, фармацевтичні залишки, мікропластик та складні суміші речовин із різними механізмами токсичної дії [1, 2]. Хімічний аналіз є необхідною складовою екологічної оцінки, проте він не завжди відтворює реальний біологічний ефект, особливо за умов хронічного надходження низьких концентрацій, комбінованої дії забруднювачів і вираженої просторово-часової мінливості середовища [3, 4]. Саме тому біоіндикація у межах екологічної токсикології розглядається не як допоміжний, а як змістовний центральний інструмент, який дозволяє співвіднести хімічне навантаження з відповіддю живих систем.

Актуальність проблеми посилюється тим, що класичні схеми моніторингу тривалий час були зорієнтовані або на окремі тест-організми, або на опис структурних змін угруповань без достатнього зв'язку з механізмами токсичної дії [1, 5]. Унаслідок цього між ранніми сублетальними порушеннями та більш пізніми екосистемними наслідками нерідко виникає інтерпретаційний розрив. Для екологічної токсикології це має принципове значення, оскільки саме раннє виявлення функціонального напруження, пригнічення репродукції, зміщення трофічних взаємодій або витіснення чутливих таксонів визначає можливості попередження деградації водних систем [3, 6].

Сучасний етап розвитку галузі характеризується переходом від одноіндикаторних моделей до багаторівневих підходів, де поєднуються організмові, популяційні, ценотичні та молекулярні показники [7, 8]. Водночас не вирішеними залишаються питання відбору найбільш інформативних біоіндикаторів для різних типів контамінантів, зіставлення класичних морфологічних методів із новими молекулярними технологіями, а також стандартизації інтегральних індексів, здатних узгодити різнорівневі сигнали в єдину аналітичну модель [9, 10]. Саме ці наукові прогалини обумовлюють необхідність системного перегляду сучасних підходів до біоіндикації стану водних екосистем у токсикологічному контексті.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Guerrero Aguilar та ін. узагальнили історичну еволюцію біомоніторингових підходів і показали, що найстійкішу методичну цінність зберігають комбінації водоростей, бентосних безхребетних та риб, оскільки вони фіксують як локальні, так і інтегральні порушення гідроекологічного режиму [1]. Ceschin та ін. обґрунтували, що макрофіти не можна розглядати лише як фоновий елемент угруповання, оскільки саме вони часто акумулюють наслідки тривалого токсичного навантаження та гідроморфологічних змін, які лишаються недостатньо помітними на рівні короткотривалих тестів [11]. Taurozzi та ін. довели високу діагностичну цінність діатомей, особливо для виявлення складних градієнтів мінералізації, трофності та фізико-хімічних зсувів, проте підкреслили їхню залежність від типу середовища та гідрологічної мінливості [7].

Rosner та ін. наполягають на багатотаксонному підході, за якого оцінка токсичного тиску не зводиться до кількох стандартних модельних видів, оскільки звуження спектра тест-організмів збіднює екологічну валідність висновків [5]. Leung та ін. показали, що *Daphnia* зберігає статус ключового модельного об'єкта завдяки поєднанню високої чутливості, короткого життєвого циклу та придатності до тестування як класичних токсикологічних кінцевих точок, так і нових молекулярних або метаболомічних маркерів [6]. Chen та ін. довели, що водні мікроорганізми здатні забезпечувати ранню фіксацію токсичної дії, особливо у випадку швидких сублетальних зрушень, тоді як Antil та ін. підкреслили зростаюче значення циліат як біоіндикаторів у забруднених прісноводних системах [2, 12].

El-SiKaily та Shabaka узагальнили, що сучасна еко-токсикологічна діагностика дедалі частіше спирається на багаторівневі біомаркери, від оксидативного стресу до поведінкових зрушень, але без інтегруючої процедури такі сигнали важко узгодити між собою [3]. У цьому контексті принципове значення мають праці Beliaeff і Burgeot, Devin та ін., а також Serafim та ін., які сформували і розвинули концепцію інтегрованої біомаркерної відповіді, показавши її корисність, але й методичні



ризиків у випадку некоректної нормалізації, добору маркерів або інтерпретації сезонної мінливості [4, 9, 10].

**Мета.** Визначити роль біоіндикація стану водних екосистем у контексті екологічної токсикології.

**Матеріали та методика досліджень.** Дослідження виконано як аналітичний огляд сучасних наукових джерел. Пошук літератури проведено в базах Web of Science, Scopus, PubMed. Критеріями включення були тематична відповідність проблемі, наявність чітко окресленого біоіндикаторного або біомаркерного підходу, зв'язок із оцінкою токсичного навантаження у водних середовищах, а також методична значущість для сучасної системи екотоксикологічного моніторингу. До остаточного корпусу аналізу включено 15 джерел. Застосовано методи бібліосемантичного аналізу, систематизації, порівняння, синтезу та узагальнення літературних даних. Матеріал групували за рівнями біоіндикаційної відповіді: таксономічно-спільнотний, організово-функціональний, біомаркерний та молекулярно-оміксний.

**Результати досліджень.** Аналіз джерел показав, що біоіндикація у водній екотоксикології розвивається у напрямі методичної інтеграції. Якщо ранні підходи були орієнтовані переважно на оцінку стану угруповань або на результати тестування кількох модельних видів, то сучасна парадигма виходить із того, що жоден окремий біоіндикатор не є універсальним [1, 5]. Саме тому у центрі уваги опинилося поєднання чутливих тест-організмів, польових індикаторних угруповань, багатобіомаркерних панелей та інструментів молекулярного профілювання [3, 8]. Такий перехід має не лише технічне, а й концептуальне значення, оскільки дозволяє простежити причинний ланцюг від контакту з контамінантом до функціональної перебудови екосистеми.

Guerrero Aguilar та ін. проаналізували понад 800 публікацій і дійшли висновку, що найстійкішими в практиці моніторингу залишаються три групи індикаторів, водорості, макрзообентос і риби [1]. Їхній огляд важливий тим, що автори не обмежилися переліком таксонів, а розмежували підходи за типом метрик. Вони показали, що біотичні індекси, різноманіття, мултиметричні моделі, функціональні метрики та нові покоління біомоніторингу вирішують різні аналітичні задачі.

На рівні фотосинтезуючих індикаторів особливу позицію посідають діатомеї та макрофіти. Taurozzi та ін., узагальнивши 512 джерел про ефемерні прісноводні системи, наголошують, що діатомові угруповання є надзвичайно чутливими до змін електропровідності, рН, температури та гідрологічного режиму [7]. Автори показали, що діатомеї добре працюють як ранні індикатори градієнтних зсувів, але для коректної інтерпретації потребують жорсткої екосистемної прив'язки. Цей висновок є принциповим: висока чутливість без екологічного контексту може збільшувати кількість сигналів, але не завжди покращує діагностику причин стресу.

Ceschin та ін. підходять до цієї проблеми з іншого боку і доводять, що водні макрофіти не можна вважати другорядними біоіндикаторами [11]. Вони інтегрують ефекти тривалішого забруднення, акумулюють наслідки трансформації донних відкладів, змін прозорості, евтрофікації та токсичного впливу на рівні місцезростання. Із

цього випливає важливий методичний висновок: діатомеї є сильними індикаторами коротшого та швидше мінливого градієнта, тоді як макрофіти краще віддзеркалюють хронічні і структурні порушення [11].

У блоці організово-функціональної біоіндикації центральне місце зберігають водні безхребетні. Rosner та ін. переконливо показали, що в екотоксикологічних дослідженнях спостерігається таксономічний дисбаланс, коли надмірна орієнтація на обмежений набір модельних видів спрощує експеримент, але знижує екологічну репрезентативність висновків [5]. Автори наполягають на широкотаксонному підході, оскільки різні безхребетні мають неоднакову трофічну позицію, різну тривалість життєвого циклу та різні механізми контакту із забруднювачем. Саме ця аргументація зближує токсикологічне тестування з реальною структурою водної спільноти.

Leung та ін. розглядають *Daphnia* не лише як класичний тест-об'єкт, а як платформу нового покоління для оцінки ризику [6]. Вони підкреслюють, що екологічна вага *Daphnia* визначається поєднанням швидкого життєвого циклу, високої чутливості до фармацевтичних речовин, металів та інших контамінантів, а також придатності до інтеграції з NAMs, AOP-підходами і мультиоміксними методами. У цьому випадку сильна сторона моделі полягає в тому, що сублетальні зміни у рості, розмноженні, живленні чи метаболізмі безпосередньо пов'язані з функціонуванням пелагічної ланки трофічної мережі.

Не менш перспективними є водні мікроорганізми і циліати. Chen та ін. у порівняльному огляді методів оцінки токсичності для водних мікроорганізмів показали, що саме ці системи часто першими фіксують токсичний сигнал, який ще не перейшов у морфологічно видимі зміни на вищих рівнях організації [2]. Автори особливо наполягають на необхідності комбінування тестів, заснованих на рості, фотосинтезі, метаболічній активності та клітинній життєздатності, оскільки окремий тест відбиває лише частину токсичного механізму. Antil та ін., аналізуючи потенціал циліат, роблять ще один важливий крок: вони пропонують не обмежуватися лише реєстрацією видової структури, а поєднувати угрупованеві сигнатури з показниками стрес-відповіді [12]. Циліати стають містком між класичною сапробіологічною традицією і сучасною молекулярною екотоксикологією.

З огляду на наведені дані, біоіндикація на організовому рівні є найціннішою тоді, коли вона дозволяє перейти від простої реєстрації наявності чи відсутності таксона до розуміння того, які функції втрачає або послаблює система під дією контамінантів. Саме тому сучасна екотоксикологія дедалі частіше оцінює не лише летальність, а репродуктивний потенціал, швидкість росту, фільтраційну активність, поведінкові реакції та міжгенераційні ефекти [2, 5, 6, 12].

Для систематизації сучасних біоіндикаторних підходів доцільно зіставити не лише таксономічні групи, а й той рівень інформації, який вони забезпечують у токсикологічному моніторингу. Це дозволяє точніше визначити, коли певний індикатор виконує роль раннього сенсора, а коли він відображає вже сформовану екосистемну перебудову (табл. 1) [2, 6].

Таблиця 1

**Порівняльна характеристика сучасних біоіндикаторних підходів у водній екотоксикології**

Група індикаторів	Що відображає	Сильна сторона	Обмеження	Джерела
Діатомеї	Швидкі зсуви у фізико-хімічних градієнтах, трофності, мінералізації	Висока чутливість і добра просторово-часова деталізація	Потребують урахування гідрологічного та біогеографічного контексту	[1, 7]
Макрофіти	Наслідки хронічного забруднення і трансформації місцезростань	Інтегрують тривалі зміни середовища	Повільніша відповідь на короткі токсичні імпульси	[1, 11]
Макрозообентос	Структурні та функціональні зміни донних угруповань	Добре відображає екологічну якість водойми	Морфологічна ідентифікація трудомістка; чутливість залежить від таксона	[1, 5, 13]
Дарфнія та інший зоопланктон	Сублетальні ефекти, репродукцію, ріст, метаболічні зсуви	Висока відтворюваність тестів, придатність до NAMs	Лабораторна модель не охоплює всього спектра польових взаємодій	[6]
Мікроорганізми і циліати	Ранню клітинну реакцію, порушення метаболізму, стрес-відповідь	Висока чутливість до короткочасного і сублетального впливу	Результати чутливі до методики культивування та вибору кінцевої точки	[2, 12]
Біомаркерні панелі та IBR	Механізми токсичної дії від субклітинного до організмового рівня	Дозволяють інтегрувати різномірні сигнали	Потребують стандартизації та коректної нормалізації	[3, 4, 9, 10]
Оміксні та eDNA-підходи	Приховані молекулярні та таксономічні зсуви, недоступні морфології	Висока роздільна здатність і рання діагностика	Методозалежність, потреба у референсних базах і стандартах аналізу	[8, 13–15]

Жодна група індикаторів не охоплює весь ланцюг токсичного процесу самостійно. Діатомеї, циліати та мікроорганізми демонструють високу чутливість на ранніх етапах порушення, але потребують контекстуалізації через абіотичні параметри та структуру угруповання [1, 2, 7, 12]. Макрофіти і риби, навпаки, краще інтегрують тривалі зміни, проте реагують повільніше [1, 11]. Безхребетні моделі, передусім *Daphnia* та макрозообентос, займають проміжну позицію і тому є особливо корисними для зв'язування лабораторної токсикології з польовим моніторингом [6]. Найперспективнішим напрямом є не конкуренція цих підходів, а їх ієрархічне поєднання.

Біомаркерний рівень аналізу істотно змінив характер інтерпретації токсичного впливу. El-SiKaily та Shabaka переконливо доводять, що біомаркери мають найбільшу аналітичну цінність тоді, коли охоплюють кілька рівнів біологічної організації, від молекулярного і клітинного до організмового [3]. Автори наполягають, що окремий біомаркер не може слугувати достатньою підставою для висновку про екологічний стан, оскільки навіть виражена біохімічна відповідь не завжди означає розвиток стійкого ушкодження. Цей підхід зміщує акцент із пошуку «ідеального маркера» на конструювання змістовної батареї показників.

Beliaeff та Burgeot запропонували інтегровану біомаркерну відповідь як інструмент екологічної оцінки саме тому, що польові умови майже завжди продукують мозаїчні сигнали [9]. Їхня ідея полягала у зведенні різномірних реакцій у єдиний індекс, здатний відобразити

загальний рівень стресу. Надалі Devin та ін. показали, що без належної нормалізації, вибору референсних значень і контролю за статистичними ефектами інтегрований індекс реакції біомаркерів (IBR) легко перетворюється на формально зручний, але методично вразливий показник [10]. Отже, сам факт інтеграції даних ще не гарантує наукової коректності. Потрібна прозора процедура конструювання індексу, інакше інтегральна оцінка втрачає зміст.

Практичну значущість IBR добре продемонстрували Serafim та ін., які застосували цей індекс у двох португальських водних системах з вираженим антропогенним тиском [4]. Автори показали, що інтегрований підхід краще відображає сезонну мінливість токсичного навантаження, ніж ізольоване тлумачення окремих ферментативних або фізіологічних маркерів. Для водної токсикології це має принципове значення, оскільки реальний ризик формується не лише концентрацією речовини, а й часовою конфігурацією експозиції, температурним режимом, гідродинамікою та фоновим станом організмів.

Відповідно, біомаркерна біоіндикація повинна розглядатися як механістичне ядро екотоксикологічного моніторингу. Вона потрібна не для ізольованого вимірювання стресу, а для встановлення того, які саме фізіологічно-біохімічні ланки є найбільш вразливими до певного типу забруднювача, наскільки стійкою є відповідь і чи трансформується вона у порушення на вищих рівнях організації.

Сучасна література дозволяє розглядати біоіндикацію як багаторівневу послідовність подій, у якій ранній

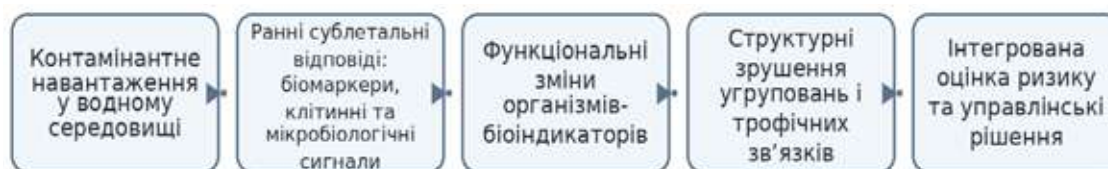


Рис. 1. Модель біоіндикації у водній екотоксикології

клітинний або мікробіологічний сигнал поступово переходить у функціональні та ценотичні зміни (рис. 1).

Рисунок 1 показує, що найбільш науково продуктивною є така модель моніторингу, у якій жодний рівень не відривається від іншого. Якщо оцінка обмежується лише наявністю контамінанта, вона не дає відповіді на питання про біологічний ефект. Якщо фіксуються лише біохімічні реакції, але не аналізується структура угруповань, неможливо встановити екологічну вагу цих змін. Якщо ж використовуються лише угрупованеві індекси, то втрачається механістичне пояснення токсичної дії.

Перехід до молекулярно-омікських технологій став однією з найпомітніших тенденцій останнього десятиліття. Machuca-Serúveda та ін. показали, що геноміка, метагеноміка, транскриптоміка, протеоміка, метаболоміка та мультиомікські комбінації вже не є експериментальною периферією, а поступово входять до інструментарію прісноводного біомоніторингу [8]. Їхній огляд важливий тим, що автори прямо вказують на ключову перевагу омікських підходів, а саме здатність виявляти зміни до того, як вони стануть видимими на морфологічному або популяційному рівнях. Водночас вони наполягають на необхідності стандартизації протоколів, біоінформатичного аналізу та екологічного тлумачення результатів.

Múrria та ін. на матеріалі прісноводного макрозобентосу показали, що bulk-метабаркодинг і водний eDNA не є взаємозамінними технологіями [13]. Автори доводять, що bulk-підхід демонструє більшу конгруентність із морфологічною оцінкою, тоді як eDNA виявляє комплементарну частину різноманіття, але поки що не завжди коректно відтворює бентосні спільноти у водній товщі. Цей висновок має безпосереднє прикладне значення: молекулярна чутливість не дорівнює автоматично більшій екологічній точності. Метод потрібно обирати не за технологічною новизною, а за відповідністю моніторинговому завданню [13].

Chen та ін. ще чіткіше показують цю проблему на рівні праймерного дизайну [14]. Вони систематично продемонстрували, що результати eDNA-метабаркодингу істотно залежать від вибору праймерів, таксономічного охоплення та середовища аналізу. Це означає, що молекулярний моніторинг не може вважатися стандартизованим «чорним ящиком». Його наукова сила проявляється лише за умови прозорої методичної архітектури. Esser та ін. у свою чергу наполягають, що секвенування нового покоління має змінити підхід до прісноводного моніторингу, оскільки дозволяє перейти від реєстрації окремих видів до аналізу структури функціональних і мікробних мереж [15]. У цьому полягає

стратегічна цінність NGS для екологічної токсикології: оцінюється не лише те, хто присутній у системі, а й те, як змінюється її функціональний потенціал.

Разом із тим сучасні молекулярні технології не скасовують класичної біоіндикації. Навпаки, наявні джерела переконливо показують, що найбільш надійні висновки отримують тоді, коли омікські та eDNA-підходи вбудовуються у вже існуючу систему таксономічної, функціональної і біомаркерної оцінки [13–15]. У цьому разі молекулярний сигнал не підмінює собою екологічний аналіз, а поглиблює його.

#### Висновки.

1. Біоіндикація у водній екологічній токсикології включає багаторівневою систему оцінки, яка включає таксономічні індикатори, функціональні ознаки, біомаркери та молекулярні інструменти.

2. Діатомеї, макрофіти, *Daphnia*, циліати, водні мікроорганізми та багатотаксонні угруповання відображають різні часові та механістичні зрізи токсичного навантаження. Саме тому вибір біоіндикатора повинен визначатися типом контамінанта, тривалістю експозиції та тим рівнем екологічної відповіді, який необхідно зафіксувати.

3. Омікські технології, eDNA-метабаркодинг і секвенування нового покоління підвищують рівень чутливості оцінки. Хоча однак найбільш ефективні результати вони мають лише у складі інтегрованої моделі моніторингу, а не як ізольована заміна класичних підходів.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

- Guerrero Aguilar A., Rodríguez Castrejón U. E., Serafín Muñoz A. H., Schüth C., Noriega Luna B. Bioindicators and biomonitoring: Review of methodologies applied in water bodies and use during the Covid-19 pandemic. *Acta Universitaria*. 2022. Vol. 32. P. e3388. <https://doi.org/10.15174/au.2022.3388>
- Chen H., Li Y., Chen Q. Methodologies for assessing chemical toxicity to aquatic microorganisms: A comparative review. *Molecules*. 2026. Vol. 31(3). P. 485. <https://doi.org/10.3390/molecules31030485>
- El-Sikaily A., Shabaka S. Biomarkers in aquatic systems: Advancements, applications and future directions. *Egyptian Journal of Aquatic Research*. 2024. Vol. 50(2). P. 169-182. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2024.05.002>
- Serafim A., Company R., Lopes B., Fonseca V. F., França S., Vasconcelos R. P., Bebianno M. J., Cabral H. N. Application of an integrated biomarker response index (IBR) to assess temporal variation of environmental quality in two Portuguese aquatic systems. *Ecological Indicators*. 2012. Vol. 19. P. 215-225. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.08.009>

5. Rosner A., Ballarin L., Barnay-Verdier S., Borisenko I., Drago L., Drobne D., et al. A broad-taxa approach as an important concept in ecotoxicological studies and pollution monitoring. *Biological Reviews*. 2024. Vol. 99(1). P. 131-176. <https://doi.org/10.1111/brv.13015>
6. Leung A., Rowan E., Melati Chiappara F., Grintzalis K. Water Monitoring Practices 2.0-Water Fleas as Key Species in Ecotoxicology and Risk Assessment. *Limnological Review*. 2025. Vol. 25(3). P. 30. <https://doi.org/10.3390/limnolrev25030030>
7. Taurozzi D., Cesarini G., Scalici M. Diatoms as bioindicators for health assessments of ephemeral freshwater ecosystems: A comprehensive review. *Ecological Indicators*. 2024. Vol. 166. P. 112309. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112309>
8. Machuca-Sepúlveda J., Miranda J., Lefin N., Pedroso A., Beltrán J. F., Farias J. G. Current status of omics in biological quality elements for freshwater biomonitoring. *Biology*. 2023. Vol. 12(7). P. 923. <https://doi.org/10.3390/biology12070923>
9. Beliaeff B., Burgeot T. Integrated biomarker response: A useful tool for ecological risk assessment. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2002. Vol. 21(6). P. 1316-1322. <https://doi.org/10.1002/etc.5620210629>
10. Devin S., Burgeot T., Giambérini L., Minguez L., Pain-Devin S. The integrated biomarker response revisited: Optimization to avoid misuse. *Environmental Science and Pollution Research*. 2014. Vol. 21(4). P. 2448-2454. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2169-9>
11. Ceschin S., Bellini A., Scalici M. Aquatic plants and ecotoxicological assessment in freshwater ecosystems: A review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28(5). P. 4975-4988. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11496-3>
12. Antil S., Varatharajan G. R., Ndayishimiye J. C., Nyirabuhoro P., Saldaev D., Kumar S., Toteja R., Makhija S., La Terza A., Mazei Y. A. Ciliates as next-generation bioindicators in pollution-impacted freshwaters: Integrating community signatures with stress-response endpoints. *Journal of Microbiological Methods*. 2026. Vol. 242. P. 107412. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2026.107412>
13. Múrria C., Wangenstein O. S., Somma S., Väisänen L., Fortuño P., Arnedo M. A., Prat N. Taxonomic accuracy and complementarity between bulk and eDNA metabarcoding provides an alternative to morphology for biological assessment of freshwater macroinvertebrates. *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 935. P. 173243. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173243>
14. Chen X., Yan Z., Li S., Zhou W., Xu S., Feng Y., Yang C., Ma J., Hu Z., Yang J. Advancing aquatic biodiversity assessments of invertebrates using eDNA metabarcoding: A systematic evaluation of primers for marine and freshwater communities. *Methods in Ecology and Evolution*. 2025. Vol. 16(10). P. 2408-2430. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.70152>
15. Esser M., Brinkmann M., Hecker M. Solving freshwater conservation challenges through next-generation sequencing approaches. *Environmental Science: Advances*. 2024. Vol. 3(9). P. 1181-1196. <https://doi.org/10.1039/D4VA00112E>
- REFERENCES:**
1. Guerrero Aguilar, A., Rodríguez Castrejón, U. E., Serafín Muñoz, A. H., Schüth, C., & Noriega Luna, B. (2022). Bioindicators and biomonitoring: Review of methodologies applied in water bodies and use during the Covid-19 pandemic. *Acta Universitaria*, 32, e3388. <https://doi.org/10.15174/au.2022.3388>
2. Chen, H., Li, Y., & Chen, Q. (2026). Methodologies for assessing chemical toxicity to aquatic microorganisms: A comparative review. *Molecules*, 31(3), 485. <https://doi.org/10.3390/molecules31030485>
3. El-SiKaily, A., & Shabaka, S. (2024). Biomarkers in aquatic systems: Advancements, applications and future directions. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 50(2), 169-182. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2024.05.002>
4. Serafim, A., Company, R., Lopes, B., Fonseca, V. F., França, S., Vasconcelos, R. P., Bebianno, M. J., & Cabral, H. N. (2012). Application of an integrated biomarker response index (IBR) to assess temporal variation of environmental quality in two Portuguese aquatic systems. *Ecological Indicators*, 19, 215-225. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.08.009>
5. Rosner, A., Ballarin, L., Barnay-Verdier, S., Borisenko, I., Drago, L., Drobne, D., et al. (2024). A broad-taxa approach as an important concept in ecotoxicological studies and pollution monitoring. *Biological Reviews*, 99(1), 131-176. <https://doi.org/10.1111/brv.13015>
6. Leung, A., Rowan, E., Melati Chiappara, F., & Grintzalis, K. (2025). Water Monitoring Practices 2.0-Water Fleas as Key Species in Ecotoxicology and Risk Assessment. *Limnological Review*, 25(3), 30. <https://doi.org/10.3390/limnolrev25030030>
7. Taurozzi, D., Cesarini, G., & Scalici, M. (2024). Diatoms as bioindicators for health assessments of ephemeral freshwater ecosystems: A comprehensive review. *Ecological Indicators*, 166, 112309. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112309>
8. Machuca-Sepúlveda, J., Miranda, J., Lefin, N., Pedroso, A., Beltrán, J. F., & Farias, J. G. (2023). Current status of omics in biological quality elements for freshwater biomonitoring. *Biology*, 12(7), 923. <https://doi.org/10.3390/biology12070923>
9. Beliaeff, B., & Burgeot, T. (2002). Integrated biomarker response: A useful tool for ecological risk assessment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 21(6), 1316-1322. <https://doi.org/10.1002/etc.5620210629>
10. Devin, S., Burgeot, T., Giambérini, L., Minguez, L., & Pain-Devin, S. (2014). The integrated biomarker response revisited: Optimization to avoid misuse. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(4), 2448-2454. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2169-9>
11. Ceschin, S., Bellini, A., & Scalici, M. (2021). Aquatic plants and ecotoxicological assessment in freshwater ecosystems: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(5), 4975-4988. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11496-3>
12. Antil, S., Varatharajan, G. R., Ndayishimiye, J. C., Nyirabuhoro, P., Saldaev, D., Kumar, S., Toteja, R., Makhija, S., La Terza, A., & Mazei, Y. A. (2026). Ciliates as next-generation bioindicators in pollution-impacted freshwaters: Integrating community signatures with stress-response endpoints. *Journal of Microbiological Methods*, 242, 107412. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2026.107412>

13. Múrria, C., Wangensteen, O. S., Somma, S., Väisänen, L., Fortuño, P., Arnedo, M. A., & Prat, N. (2024). Taxonomic accuracy and complementarity between bulk and eDNA metabarcoding provides an alternative to morphology for biological assessment of freshwater macroinvertebrates. *Science of the Total Environment*, 935, 173243. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173243>
14. Chen, X., Yan, Z., Li, S., Zhou, W., Xu, S., Feng, Y., Yang, C., Ma, J., Hu, Z., & Yang, J. (2025). Advancing aquatic biodiversity assessments of invertebrates using eDNA metabarcoding: A systematic evaluation of primers for marine and freshwater communities. *Methods in Ecology and Evolution*, 16(10), 2408-2430. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.70152>
15. Esser, M., Brinkmann, M., & Hecker, M. (2024). Solving freshwater conservation challenges through next-generation sequencing approaches. *Environmental Science: Advances*, 3(9), 1181-1196. <https://doi.org/10.1039/D4VA00112E>

**Федорчук І.В., Козак М.І., Кондратюк А.**  
**Біоіндикація стану водних екосистем у контексті екологічної токсикології**

**Мета.** Визначити роль біоіндикація стану водних екосистем у контексті екологічної токсикології

**Методи.** Роботу виконано як аналітичний огляд. Пошук джерел проведено в базах Web of Science, Scopus, PubMed та на платформах провідних наукових видавців. До огляду включено 15 джерел, що відображають сучасні напрями біоіндикації у водній екотоксикології, а також фундаментальні праці з інтегрованої біомаркерної оцінки. Використано бібліосемантичний аналіз, порівняння, систематизацію, проблемно-аналітичну інтерпретацію та критичне зіставлення підходів на різних рівнях біологічної організації.

**Результати.** Показано, що сучасна біоіндикація перестала обмежуватися описом видового складу і дедалі частіше спирається на поєднання таксономічних, функціональних, фізіолого-біохімічних та молекулярних ознак. Діатомеї залишаються однією з найчутливіших груп для оцінки градієнтів трофності, мінералізації та комплексного хімічного навантаження. Тоді як макрорфіти краще інтегрують наслідки хронічного впливу і змін середовища у просторі та часі. Зоопланктонні моделі, насамперед *Daphnia*, забезпечують високу відтворюваність токсикологічних тестів і дають змогу оцінити репродуктивні, поведінкові та метаболічні зрушення. Циліати і водні мікроорганізми розглядаються як перспективні індикатори ранньої реакції на стресори, особливо у випадках, коли потрібна висока чутливість до короткотривалого або сублетального впливу. Суттєвого значення набули біомаркерні батареї та інтегральні індекси. Вони дозволяють агрегувати відповіді від субклітинного до організмового рівня, але вимагають жорсткої стандартизації для уникнення хибних висновків. Окремо встановлено, що оміксні технології, eDNA-метабаркодинг та секвенувальні платформи нового покоління підвищують таксономічну роздільну здатність моніторингу та дають змогу виявляти зрушення, які не завжди фіксуються морфологічними методами.

**Висновки.** Найбільшу наукову та практичну цінність має комплексна модель біоіндикації, що поєднує класичні угруповання індикаторів, оцінку за допомогою декількох біомаркерів та молекулярні методи. Така система підвищує чутливість моніторингу, покращує причинно-наслідкову інтерпретацію екологічних змін та наближає оцінку токсичного ризику до реальних процесів, що відбуваються у водних екосистемах.

**Ключові слова:** біомоніторинг, діатомеї, макрозообентос, молекулярні маркери, eDNA-метабаркодинг, інтегральна біомаркерна відповідь, контамінанти.

**Fedorchuk I.V., Kozak M.I., Kondratiuk A.**  
**Bioindication of the State of Aquatic Ecosystems in the Context of Environmental Toxicology**

**Purpose.** To determine the role of bioindication of the state of aquatic ecosystems in the context of environmental toxicology.

**Methods.** The study was designed as a narrative analytical review. The literature search was conducted in Web of Science, Scopus, PubMed and on the platforms of major academic publishers. Fifteen sources were selected, covering current directions in aquatic bioindication and the key methodological works on integrated biomarker assessment. Bibliosemantic analysis, comparison, systematization, problem-oriented interpretation and critical cross-reading of approaches operating at different levels of biological organization were applied.

**Results.** The analysis showed that contemporary bioindication is no longer limited to descriptive taxonomy and increasingly relies on the integration of taxonomic, functional, physiological, biochemical and molecular evidence. Diatoms remain among the most sensitive indicators for trophic gradients, mineralization and complex chemical pressure, whereas macrophytes better integrate the consequences of chronic exposure across space and time. Zooplankton models, especially *Daphnia*, provide highly reproducible toxicity testing and reveal reproductive, behavioural and metabolic alterations. Ciliates and aquatic microorganisms are emerging as sensitive indicators of early stress responses, particularly under short-term and sublethal exposure scenarios. Multibiomarker batteries and integrated indices such as IBR substantially improve the interpretability of suborganismal responses, although their use requires strict normalization and methodological discipline. Omics technologies, eDNA metabarcoding and next-generation sequencing further enhance taxonomic resolution and detect community shifts that may remain hidden when only morphology-based approaches are used.

**Conclusions.** The highest scientific and practical value belongs to an integrated bioindication model combining classical indicator assemblages, multibiomarker assessment and molecular methods. Such a framework increases monitoring sensitivity, improves causal interpretation of ecological change and brings toxic risk assessment closer to the real processes occurring in aquatic ecosystems.

**Key words:** biomonitoring, diatoms, macrozoobenthos, molecular markers, eDNA metabarcoding, integrated biomarker response, contaminants.

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.05.2026  
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026