



**Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE  
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ВІСНИК КРЕМЕНЧУЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО

TRANSACTIONS OF KREMENCHUK MYKHAILO OSTROHRADSKYI NATIONAL UNIVERSITY

Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2025. – Випуск 5(154) – 340 с.

TRANSACTIONS OF KREMENCHUK MYKHAILO OSTROHRADSKYI NATIONAL UNIVERSITY. – KREMENCHUK: KRNU, 2025. – ISSUE 5(154) – 340 P.

ISSN 1995–0519  
e-ISSN 2072–8263

**ПРОФЕСІЙНА ОСВІТА**

- [ЗАКОН РІВНОВАГИ ЯК МЕТОДОЛОГІЧНА ОСНОВА МОДЕЛЮВАННЯ МИСЛЕННЯ КУХАРЯ ПІД ЧАС ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМНИХ ВИРОБНИЧИХ СИТУАЦІЙ](#) 13  
*Лариса Бачієва*
- [ПІДГОТОВКА МАЙБУТНІХ ПСИХОЛОГІВ ДО КОУЧИНГОВОЇ РОБОТИ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ: КОМПАРАТИВНИЙ АНАЛІЗ](#) 20  
*Олена Беспарточна, Тамара Поясок*
- [СПИСУВАННЯ НА ОНЛАЙН-ЕКЗАМЕНІ З ВИЩОЇ МАТЕМАТИКИ: СТАТИСТИЧНИЙ ТА ЙМОВІРНІСНИЙ АНАЛІЗ СТРАТЕГІЙ СТУДЕНТІВ](#) 27  
*Ірина Блажівська*
- [ТЬЮТОРСТВО ЯК ЕЛЕМЕНТ ТВОРЧОЇ ПІДТРИМКИ СТУДЕНТІВ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ А2 ДОШКІЛЬНА ОСВІТА ТА А3 ПОЧАТКОВА ОСВІТА](#) 39  
*Марія Замелюк, Алла Хомярчук, Іванна Замелюк*
- [ЦИФРОВА КОМПЕТЕНТНІСТЬ ЯК СКЛАДОВА ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ МАЙБУТНІХ ФАХІВЦІВ ПРОФЕСІЙНОЇ ОСВІТИ](#) 47  
*Олена Ковшар*
- [ОСВІТНЯ ІНТЕРПРЕТАЦІЯ DEVOPS-ЦИКЛУ: ДИДАКТИЧНІ МОЖЛИВОСТІ ТА УМОВИ РЕАЛІЗАЦІЇ У ПІДГОТОВЦІ ІТ-ФАХІВЦІВ](#) 55  
*Михайло Лучкевич*

**ЕКОНОМІКА**

- [ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ІНВЕСТИЦІЙНОЇ ПРИВАБЛИВОСТІ ПІДПРИЄМСТВ У ЦИФРОВІЙ ЕКОНОМІЦІ](#) 62  
*Юлія Тимошенко*

**МЕНЕДЖМЕНТ**

- [МАСШТАБУВАННЯ ВІРТУАЛЬНИХ КОМАНД В УМОВАХ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ТА ГЛОБАЛІЗАЦІЇ: ЧИННИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ОПТИМАЛЬНІ ПІДХОДИ](#) 68  
*Денис Загірняк, Сергій Певнев*
- [ІНТЕГРАЦІЯ УПРАВЛІННЯ ДОСТУПОМ ПРИВІЛЕЙОВАНИХ КОРИСТУВАЧІВ У ПРОЕКТИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ПІДПРИЄМСТВА](#) 77  
*Олександр Храткін*

**ЕКОЛОГІЯ**

- [ГЕОІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ЕКОЛОГІЧНОЇ МЕРЕЖІ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРИДНІПРОВ'Я](#) 85  
*Ячеслав Дубровський, Олена Дем'янюк*
- [БІОМОНІТОРИНГ У КОНТЕКСТІ ЦИФРОВОЇ ЕКОЛОГІЇ: ІНТЕГРАЦІЯ БІОЛОГІЧНИХ, АНАЛІТИЧНИХ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕТОДІВ У СИСТЕМАХ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА СТАНОМ ДОВКІЛЛЯ](#) 94  
*Оксана Ничик, Андрій Котинський, Ольга Тогагинська, Оксана Салавор, Наталія Бублієнко*

## БІОМОНІТОРИНГ У КОНТЕКСТІ ЦИФРОВОЇ ЕКОЛОГІЇ: ІНТЕГРАЦІЯ БІОЛОГІЧНИХ, АНАЛІТИЧНИХ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕТОДІВ У СИСТЕМАХ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА СТАНОМ ДОВКІЛЛЯ

### Оксана Ничик

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та екоменеджменту  
Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, Київ, Україна, 01033,  
[nychik@ukr.net](mailto:nychik@ukr.net)  
**ORCID: 0000-0002-4679-8607**

### Андрій Котинський

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та екоменеджменту  
Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, Київ, Україна, 01033,  
[nimuskav@gmail.com](mailto:nimuskav@gmail.com)  
**ORCID: 0000-0003-4392-7538**

### Ольга Тогачинська

кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології та екоменеджменту  
Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, Київ, Україна, 01033,  
[tytyn29@ukr.net](mailto:tytyn29@ukr.net)  
**ORCID: 0000-0002-6672-6539**

### Оксана Салавор

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та екоменеджменту  
Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, Київ, Україна, 01033,  
[saloksamir@ukr.net](mailto:saloksamir@ukr.net)  
**ORCID: 0000-0002-5784-3127**

### Наталія Бублієнко

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та екоменеджменту  
Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, Київ, Україна, 01033,  
[3110nb@gmail.com](mailto:3110nb@gmail.com)  
**ORCID: 0000-0003-0299-4646**

У статті проаналізовано сучасний стан і тенденції розвитку біологічного моніторингу в межах концепції цифрової екології. Метою дослідження є з'ясування того, як інтеграція біологічних індикаторів, аналітичних методів і цифрових технологій змінює традиційні підходи до екологічної оцінки та забезпечує можливість моніторингу екосистем у режимі реального часу. Дослідження базується на порівняльному та аналітичному огляді сучасних підходів до біомоніторингу, включно з біоіндикацією, біомаркерами, метагеномікою та аналізом екологічної ДНК, а також на прикладах інтеграції сенсорних мереж, дистанційного зондування та штучного інтелекту.

Результати показують, що біомоніторинг дедалі більше розвивається у бік гібридних моделей, які поєднують біологічні, хімічні й цифрові дані. Традиційні біоіндикатори залишаються важливими для оцінки екологічного стану, тоді як біомаркери та молекулярні інструменти підвищують чутливість і глибину механістичного розуміння. Інтеграція з цифровими платформами, геоінформаційними системами та Інтернетом речей забезпечує можливість великомасштабного та оперативного моніторингу довкілля. У статті представлено комплексний погляд на біомоніторинг як складову цифрової екології – нової парадигми, що поєднує живі системи з аналітикою, орієнтованою на дані. Наголошено на переході від описових спостережень до прогнозних, автоматизованих і стандартизованих цифрових рішень, здатних опрацьовувати різномірні екологічні дані для раннього попередження та ухвалення рішень.

Інтеграція біологічних і цифрових методів підвищує ефективність та точність екологічного моніторингу, забезпечуючи швидше виявлення екологічних ризиків і підтримуючи сталий менеджмент природних ресурсів. Отримані результати сприяють розвитку адаптивного, міждисциплінарного підходу до оцінки екосистем в Україні

та за її межами. Розвиток цифрової екології підтримує всебічне екологічне спостереження, аналіз даних у реальному часі та прогнозування.

**Ключові слова:** біомоніторинг, біоіндикатори, метагеноміка, екологічна ДНК (eDNA), цифрова екологія, штучний інтелект, дистанційне зондування, сенсорні мережі, інтегровані системи, сталий розвиток.

**Актуальність роботи.** У ХХІ столітті людство стоїть перед низкою глобальних викликів: кліматичні зміни, зростання антропогенного навантаження, втрата біорізноманіття, деградація екосистем. І все це вимагає надійних, точних і оперативних систем моніторингу стану довкілля. Традиційні підходи, які здебільшого базувались на фізико-хімічних аналізах і спостереженнях окремих видів чи організмів, часто не можуть вчасно виявити комплексні екологічні зміни або передбачити майбутні загрози. У цьому контексті роль біологічного моніторингу, а саме, спостереження за організмами чи їхніми реакціями як індикаторами стану екосистем, набуває особливої ваги.

Разом з тим, стрімкий розвиток інформаційних технологій відкриває нові можливості для екологічного спостережень. Методи дистанційного зондування, супутникового спостереження, сенсорні мережі, біосенсори і штучний інтелект дозволяють збирати, обробляти й аналізувати екологічні дані в реальному часі та з високою просторово-часовою роздільністю. Це породжує концепцію цифрової екології (digital ecology), яка передбачає інтеграцію біологічних, аналітичних та цифрових компонентів у спостереженні й управлінні екосистемами.

У межах Європейського Союзу вже реалізуються проекти, які демонструють цю інтеграцію на практиці. Наприклад, проект DTO-BioFlow спрямовано на інтеграцію даних щодо біорізноманіття у Digital Twin океану (DTO – Digital Twin of the Ocean), з метою побудови моделюючої системи, яка б дозволяла робити сценарні прогнози стану морських екосистем [1]. Аналогічно, ініціатива BioDT (Biodiversity Digital Twin) розробляє прототипи цифрових двійників для ключових видів, спільнот і екосистем, а також інтегрує генетичну детекцію біорізноманіття [2].

Попри значні успіхи, з'являються і нові потреби та виклики. Серед них забезпечення сумісності й якості біологічних, аналітичних та цифрових даних; питання інтеграції даних з різних джерел; обробки великих обсягів інформації; стандартів для біомоніторингу у цифровому середовищі; а також етичні, правові й соціальні аспекти збору й використання екологічної інформації.

**Метою статті** є висвітлення сучасного стану біологічного моніторингу в контексті цифрової екології, узагальнення методів, аналіз прикладів інтеграції біологічних, аналітичних і цифрових підходів, а також виявлення ключових викликів і перспектив на майбутнє. Зокрема, стаття має на меті відповісти на такі питання: які біологічні індикатори і біомаркери використовуються сьогодні, як змінюється їхнє застосування під впливом нових аналітичних технологій, як інформаційні технології (GIS, IoT, дистанційне зондування, ШІ) прискорюють і вдосконалюють біологічний моніторинг, у яких проєктах або на яких прикладах вже реалізована інтеграція різних підходів, і які уроки з цього витікають? Які головні бар'єри – технічні, методологічні, стандартні, етичні стоять на шляху повного розгортання інтегрованих систем біомоніторингу, і які перспективи їх подолання? На відміну від попередніх оглядів, у цій роботі акцент зроблено на інтеграції біологічних, аналітичних та цифрових підходів у контексті України.

**Матеріал і результати досліджень.** Біологічний моніторинг – це застосування живих організмів або їхніх реакцій як індикаторів стану довкілля. Розвиток біомоніторингу проходить через кілька етапів: від інтуїтивних природничих спостережень до сучасних механістичних і цифрових підходів. Зі стародавніх часів дослідники помічали, що у водоймах з органічним забрудненням змінюється вигляд дна, з'являються характерні «чорні мул» або слиз, що свідчить про деградацію середовища [3]. Однак ці спостереження були доволі суб'єктивними й неформалізованими. Більш систематичні підходи з'явилися в ХІХ-ХХ століттях, коли біологи почали класифікувати види за чутливістю до забруднень. Зокрема, лишайники стали одним із перших об'єктів біоіндикації повітря через їхню чутливість до сполук сірки.

У середині ХХ століття з'явився масштабний розвиток біоіндексів та спільнотних методів оцінки стану водойм. Наприклад: система сапробності дозволяла класифікувати річки за рівнем органічного забруднення за шкалою від «олігосапробної» (чиста) до «полісапробної» (сильно забруднена), далі були запропоновані методи, які враховували видовий склад макрозо-

обентосу, індекси BMWP, ASPT та інші біотичні індекси як інтегральні показники якості води.

У європейському контексті, з появою Директиви щодо вод (Water Framework Directive), біотичні компоненти (макрофіти, діатомові водорості, безхребетні, риби) стали ключовими елементами моніторингових програм, і велика кількість біоіндексів розроблена для оцінки стану річок і потоків [4]. Переваги цих підходів полягають в тому, що вони інтегрують комплексні впливи на екосистему. Проте їхні обмеження: обмежена чутливість до низьких рівнів забруднень, труднощі з розрізненням впливів різних стресорів, просторові та тимчасові обмеження у вибірках.

Щоб подолати обмеження спільнотних методів, у другій половині XX століття зростає інтерес до біомаркерів і біотестів: біомаркери – молекулярні, клітинні або біохімічні показники, які реагують на вплив токсикантів або стресу (наприклад, індукція ферментів детоксикації, рівні окисного стресу, зміни експресії генів); біотести (*in vitro* або експозиційні тести) дозволяють виявляти токсичність певного субстрату або водного зразка у контрольованих умовах; методи, засновані на ефектах (EBMs) поєднують біоіндикатори спільнот з біомаркерами та результати біотестів, щоб отримати механістичне пояснення впливу [4]. Ці підходи дозволяють уточнити, які саме механізми впливу працюють, і розрізнити реагування організмів на різні хімічні сполуки чи фактори. Однак їхнє застосування на великій території часто ускладнене через високу вартість, складність інтерпретації та необхідність калібрування.

Останні 10-15 років ознаменовані появою метагеноміки та екологічної ДНК (eDNA) як нових інструментів біомоніторингу. Метагеноміка та eDNA дозволяють виявляти види або групи організмів за слідами ДНК у воді, ґрунті чи повітрі, без необхідності прямого збору організмів [5].

Еволюція біологічного моніторингу показує, що жоден з підходів не витісняється повністю, а швидше відбувається доповнення й інтеграція, адже класичні біоіндикатори та спільнотні методи залишаються важливими для локального та масштабного моніторингу, особливо в контексті довгострокових серій; біомаркери й біотести додають механістичний рівень, дозволяючи розрізнити типи стресів; метагеноміка та eDNA-методи надають новий рівень роздільної здатності і чутливості, особливо для видових груп, які

важко спостерігати традиційно. Останній крок – об'єднання даних із сенсорних мереж (IoT), алгоритмів машинного навчання і цифрових платформ – у напрямі цілісних інтегрованих систем моніторингу, здатних працювати в режимі реального часу. Інформацію, яка характеризує мету та основні переваги та обмеження всіх вищенаведених підходів біологічного моніторингу наведено в таблиці 1.

В Україні біоіндикаційні методи використовують для оцінювання стану поверхневих вод вже декілька десятиліть. Наприклад, в дослідженні [6] показано, що фітопланктон реагує на зміни у гідрохімічному складі, й це дає швидкий сигнал про погіршення якості води.

З часом до біоіндикаційних підходів додали аналітичні методи й біомаркери – біологічні середовища, такі як кров, волосся, що використовується для оцінки рівнів токсичних і есенційних елементів та ілюструє перехід від простого спостереження до вимірювання внутрішньоклітинних чи тілесних наслідків забруднення [7].

У інших випадках використовується моніторинг гідрохімічних показників, співставлення їх із біологічними індикаторами. Так, моніторинг поверхневих вод річки Опір поєднує хімічні аналізи з біотичними оцінками для встановлення екологічного стану вод [8].

Останніми роками в Україні з'являються роботи, у яких дослідники намагаються інтегрувати класичні й цифрові підходи. У Запорізькій області у дослідженні екологічного моніторингу розвитку посушливих процесів [9] використовуються індекси NDVI, NDWI із супутникових знімків для оцінки деградації ґрунтів і рослинності, що є прикладом цифрово-географічного підходу до екологічного моніторингу. Є приклад інтегрованої системи на Півдні України, а саме, у статті «Інтегрована система моніторингу водних ресурсів у структурі екологічної безпеки півдня України» [10] розглядаються комплекс польових, лабораторних та статистичних методів для відновлення та регулювання водного режиму басейнів.

Однак, хоча багато робіт відображають поступовий розвиток, кілька проблем лишаються недостатньо вирішеними: відсутність широкого використання молекулярних підходів (наприклад, eDNA) у великих українських водних системах, недостатня стандартизація методик і процедур, обмеженість ресурсів для постійного збору даних, а також необхідність інтеграції даних з різних джерел (біоіндикація, аналітика, дистанційне зондування).

**Порівняльна характеристика підходів біологічного моніторингу**

Етап / підхід	Основна мета / підхід	Переваги	Обмеження / виклики
Неформальні / натуралістичні спостереження	раннє сприйняття змін у флорі/фауні	інтуїтивність, місцевий контекст	суб'єктивність, обмежена кількість даних
Біоіндикатори / біотичні індекси / сапробні системи	інтегральна оцінка стану спільнот	досвідченість, дешевизна	слабка чутливість, неможливість виділити фактори
Біомаркери / біотести	механістичне розуміння відповіді організмів	чутливість, можливість диференціації	складність інтерпретацій, масштабування
ДНК-біомоніторинг / метагеноміка	виявлення видового складу, чутливе виявлення «рідкісних» видів	швидкість, висока роздільна здатність	складність інтерпретації, стандартизація
Автономні / цифрові мережі ( IoT, автономні пробовідбірники)	реальний час, масштабне покриття	оперативність, інтеграція з інформаційною інфраструктурою	витрати, складність конструкції, валідація алгоритмів

Сучасний біомоніторинг все частіше спирається на інтеграцію різних методів, що дозволяє отримати більш повну та точну картину стану екосистем. Традиційні біологічні підходи, такі як спостереження за макрзообентосом, фітопланктоном або лишайниками, у поєднанні з біомаркерами на молекулярному та клітинному рівні створюють механістичну основу для оцінки екологічного стресу. Паралельно застосування хімічних аналізів води, ґрунтів чи повітря дозволяє кількісно оцінювати рівень забруднення та співставляти його з реакціями організмів.

Цифрові технології, такі як геоінформаційні системи, дистанційне зондування та мережі сенсорів IoT, значно розширюють можливості збору та аналізу даних. Такі підходи дозволяють не лише визначати локальні зміни, а й спостерігати за динамікою екосистем на великій території в режимі реального часу.

Інтегровані підходи забезпечують підвищену точність та комплексність оцінки стану екосистем, скорочують час і ресурси, необхідні для моніторингу, а також дозволяють оперативно реагувати на екологічні ризики. Перспективи розвитку таких систем включають ширше використання молекулярних методів, автоматизацію збору й обробки даних та створення відкритих платформ для інтеграції результатів і співпраці між науковцями та управлінськими структурами.

Інтеграція даних із різних джерел є ключовим аспектом цифрової екології. Вона включає поєднання біологічних, хімічних, фізичних та соціальних даних для створення комплексних моделей, що дозволяють прогнозувати зміни

в екосистемах та оцінювати вплив антропогенних факторів.

Цифрові платформи, такі як мобільні додатки та онлайн-системи моніторингу, забезпечують доступ до екологічних даних у реальному часі та сприяють участі громадськості в процесах моніторингу. Так, у національному природному парку «Шацький» у Волинській області реалізовано проєкт із мобільними додатками для збору даних про стан флори та фауни, що дозволяє залучати місцеві громади до охорони довкілля [11].

Попри значні досягнення, цифрова екологія стикається з рядом викликів, таких як недостатня інтеграція даних із різних джерел, обмежена доступність високоякісних даних та потреба у розвитку інфраструктури для збору та обробки даних. Однак розвиток технологій, таких як штучний інтелект, машинне навчання та масиви дані, відкриває нові можливості для подолання цих викликів та подальшого розвитку цифрової екології, особливо у контексті створення інтегрованих систем раннього попередження про екологічні ризики.

Сучасні тенденції у розвитку екологічного моніторингу демонструють, що поєднання біологічних, аналітичних та цифрових методів не лише підвищує ефективність збору даних, а й відкриває нові горизонти для прогнозування та управління екологічними ризиками. Інтеграція традиційного біомоніторингу з цифровими платформами дозволяє створювати комплексні системи оцінки стану екосистем у режимі реального часу та масштабі територій різного рівня.

Поєднання даних із біоіндикаторів, хімічних аналізів та цифрових сенсорних мереж формує

основу для систем раннього попередження про екологічні загрози. Проекти, реалізовані в південних регіонах України та у прибережних зонах Чорного моря, демонструють можливість інтеграції супутникових даних, польових спостережень та аналітичних показників для виявлення деградації рослинності та змін у водних екосистемах [12].

Незважаючи на наявні досягнення, існують певні виклики: недостатнє масштабування молекулярних методів, обмежена стандартизація даних, потреба у відкритих платформах для інтеграції різнорідних джерел інформації. Разом із тим, впровадження штучного інтелекту та машинного навчання для аналізу великих масивів даних створює перспективи для ефективного прогнозування змін екосистем і розробки політик сталого управління природними ресурсами [13]. Подальший розвиток інтегрованих систем дозволить не лише підвищити ефективність наукових досліджень, а й забезпечити практичні механізми управління та охорони природних ресурсів.

#### Висновки.

1. Біологічний моніторинг залишається ключовим інструментом оцінювання стану довкілля, проте його ефективність значно зростає

завдяки інтеграції з аналітичними та цифровими технологіями.

2. Еволюція біомоніторингу – від натуралістичних спостережень і біоіндикаторів до метагеноміки та цифрових сенсорних мереж відображає поступовий перехід від описових до механістичних і прогнозних підходів.

3. Цифрова екологія створює нову парадигму моніторингу, у якій поєднання біологічних даних, аналітичних вимірів і технологій штучного інтелекту забезпечує можливість відстеження стану екосистем у реальному часі та підвищує точність прогнозування.

4. В Україні спостерігається позитивна динаміка розвитку інтегрованих систем екологічного моніторингу, проте залишаються проблеми із стандартизацією методів, впровадженням молекулярних технологій (eDNA, метагеноміка) та інфраструктурою збору даних.

5. Подальший розвиток інтегрованих підходів до біомоніторингу має спиратися на міждисциплінарну співпрацю, автоматизацію процесів збору й обробки інформації, а також створення відкритих цифрових платформ, що сприятиме ефективному управлінню природними ресурсами та реалізації принципів сталого розвитку.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Integration of biodiversity monitoring data into the Digital Twin Ocean. *CORDIS – EU research results*. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/101112823/results> (дата звернення: 24.10.2025).
2. The Biodiversity Digital Twin to help understand our planet's life. URL: <https://biодt.eu/news/biodiversity-digital-twin-help-understand-our-planets-life> (дата звернення: 24.10.2025).
3. Kitaka N., Omondi L. A., Mureithi P. W., Bauer A., Melcher A., Ssanyu G. A. A critical review of biomonitoring in East African rivers: fostering community-based collaboration for environmental change observation. *Frontiers in Water*. 2024. Vol. 6. Article ID: 1360941. DOI: <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1360941>
4. Moulinec A., Arle J., Hollert H. та ін. Assessing chemical pollution with biomonitoring approaches in streams and rivers: a critical review. *Environmental Sciences Europe*. 2025. Vol. 37. Article ID: 69. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12302-025-01110-z>
5. Banerjee P., Stewart K. A., Dey G., Antognazza C. M., Sharma R. K., Maity J. P., Saha S., Doi H., de Vere N., Chan M. W. Y. et al. Environmental DNA analysis as an emerging non-destructive method for plant biodiversity monitoring: a review. *AoB PLANTS*. 2022. Vol. 14, Issue 4. Article ID: plac031. – DOI: <https://doi.org/10.1093/aobpla/plac031> (дата звернення: 24.10.2025).
6. Ковальова І. В., Суходольська І. Л. Оцінка якості води річки Стубелка за показниками фітопланктону. *Український журнал природничих наук*. 2023. № 6. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.6.2023.13>
7. Андрусишина І. М., Лампека О. Г., Голуб І. О. Біомоніторинг експозиції токсичними металами населення та працюючих в Україні. *Актуальні проблеми профілактичної медицини*. 2023. № 26. С. 17–26. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-9067-2023-26-2>
8. Кропивницька Л., Стаднічук О., Кучер Л., Шеремета О., Платонов М. Оцінка екологічного стану поверхневих вод річки Опір. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2022. № 3. С. 49–58. DOI: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2022-3-7>
9. Мудрак О. В., Ганчук М. М., Скиба В. П., Циганов І. В., Ганчук К. О. Екологічний моніторинг розвитку посушливих процесів у Запорізькій області. *Збалансоване природокористування*. 2024. №4. С.108–115. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2024.319400>
10. Назаренко О., Березовська А., Тимошук В., Шерстюк С. Інтегрована система моніторингу водних ресурсів у структурі екологічної безпеки півдня України. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2024. № 3. С. 122–127. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-3/122>

11. Ліщенко Л., Томченко О., Мичак А. Satellite data in the substantiation and creation of objects of the Nature Reserve Fund and monitoring of their ecological condition. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*. 2025. Т. 12, № 3. С. 21–28. DOI: <https://doi.org/10.36023/ujrs.2025.12.3.287>

12. Кривохижа Є., Кутя М., Грицик О., Хмелянчишин Ю., Глеваський В. Applications of earth remote sensing for natural resource monitoring in Ukraine. *Nativa (Pesquisas Agrárias e Ambientais)*. 2024. Т. 12,

№ 4. С. 744–754. DOI: <https://doi.org/10.31413/nat.v12i4.18355>

13. Assessing Environmental Damage in Ukraine. *Input to an Environmental Compact for Ukraine: A Green Future. Recommendations for Accountability and Recovery / High-Level Working Group on the Environmental Consequences of the War.* – February 2024. URL: <https://ceobs.org/wp-content/uploads/2024/02/Assessing-Environmental-Damage-in-Ukraine.pdf>.

## **BIOMONITORING IN THE CONTEXT OF DIGITAL ECOLOGY: INTEGRATION OF BIOLOGICAL, ANALYTICAL AND INFORMATIONAL METHODS IN ENVIRONMENTAL OBSERVATION SYSTEMS**

### **Oksana Nychyk**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Environmental Management

National University of Food Technologies, 68 Volodymyrska str., Kyiv, Ukraine, 01033, [nychik@ukr.net](mailto:nychik@ukr.net)

**ORCID: 0000-0002-4679-8607**

### **Andrii Kotynskyi**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Environmental Management

National University of Food Technologies, 68 Volodymyrska str., Kyiv, Ukraine, 01033, [nimuskav@gmail.com](mailto:nimuskav@gmail.com)

**ORCID: 0000-0003-4392-7538**

### **Olga Togachynska**

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Environmental Management

National University of Food Technologies, 68 Volodymyrska str., Kyiv, Ukraine, 01033, [tytyn29@ukr.net](mailto:tytyn29@ukr.net)

**ORCID: 0000-0002-6672-6539**

### **Oksana Salavor**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Environmental Management, National University of Food Technologies, 68 Volodymyrska str., Kyiv, Ukraine, 01033, [saloksamir@ukr.net](mailto:saloksamir@ukr.net)

**ORCID: 0000-0002-5784-3127**

### **Nataliia Bublivenko**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Environmental Management

National University of Food Technologies, 68 Volodymyrska str., Kyiv, Ukraine, 01033, [3110nb@gmail.com](mailto:3110nb@gmail.com)

**ORCID: 0000-0003-0299-4646**

The article analyzes the current state and development trends of biological monitoring within the concept of digital ecology. The aim of the study is to determine how the integration of biological indicators, analytical methods, and digital technologies is transforming traditional approaches to environmental assessment and enabling real-time ecosystem monitoring. The research is based on a comparative and analytical review of modern approaches to biomonitoring, including bioindication, biomarkers, metagenomics, and environmental DNA analysis, as well as examples of integrating sensor networks, remote sensing, and artificial intelligence.

The results show that biomonitoring is increasingly evolving toward hybrid models that combine biological, chemical, and digital data. Traditional bioindicators remain important for assessing ecological conditions, while biomarkers and molecular tools enhance sensitivity and deepen mechanistic understanding. Integration with digital platforms, geographic information systems, and the Internet of Things enables large-scale and rapid environmental monitoring. The article offers a comprehensive perspective on biomonitoring as a component of digital ecology—a new paradigm that links living systems

with data-driven analytics. Emphasis is placed on the shift from descriptive observations to predictive, automated, and standardized digital solutions capable of processing diverse environmental data for early warning and decision-making.

The integration of biological and digital methods increases the efficiency and accuracy of environmental monitoring, enabling faster detection of ecological risks and supporting sustainable natural resource management. The findings contribute to the development of an adaptive, interdisciplinary approach to ecosystem assessment in Ukraine and beyond. The advancement of digital ecology supports comprehensive environmental observation, real-time data analysis, and forecasting.

**Key words:** biomonitoring, bioindicators, metagenomics, environmental DNA (eDNA), digital ecology, artificial intelligence, remote sensing, sensor networks, integrated monitoring systems, sustainable development.

## REFERENCES

1. Integration of biodiversity monitoring data into the Digital Twin Ocean. (2025). *CORDIS – EU Research Results*. Retrieved October 24, 2025, from <https://cordis.europa.eu/project/id/101112823/results>
2. The Biodiversity Digital Twin to help understand our planet's life. (2025). *BioDT Project Website*. Retrieved October 24, 2025, from <https://biодt.eu/news/biodiversity-digital-twin-help-understand-our-planets-life>
3. Kitaka, N., Omondi, L. A., Mureithi, P. W., Bauer, A., Melcher, A., & Ssanyu, G. A. (2024). A critical review of biomonitoring in East African rivers: Fostering community-based collaboration for environmental change observation. *Frontiers in Water*, 6, 1360941. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1360941>
4. Moulinec, A., Arle, J., Hollert, H., et al. (2025). Assessing chemical pollution with biomonitoring approaches in streams and rivers: A critical review. *Environmental Sciences Europe*, 37(69). <https://doi.org/10.1186/s12302-025-01110-z>
5. Banerjee, P., Stewart, K. A., Dey, G., Antognazza, C. M., Sharma, R. K., Maity, J. P., Saha, S., Doi, H., de Vere, N., Chan, M. W. Y., et al. (2022). Environmental DNA analysis as an emerging non-destructive method for plant biodiversity monitoring: A review. *AoB PLANTS*, 14(4), plac031. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plac031>
6. Kovalova, I. V., & Sukhodolska, I. L. (2023). Otsinka yakosti vody richky Stubelka za pokaznykamy fitoplanktonu [Assessment of the water quality of the Stubelka River based on phytoplankton indicators]. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychyykh nauk – Ukrainian Journal of Natural Sciences*, 6. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.6.2023.13>. [in Ukrainian].
7. Andrusyshyna, I. M., Lampeka, O. H., & Holub, I. O. (2023). Biomonitoring ekspozytzii toksychnymy metalamy naselennia ta pratsiuuichyykh v Ukraini [Biomonitoring of exposure to toxic metals among the population and workers in Ukraine]. *Aktualni problemy profilaktychnoi medytsyny – Actual Problems of Preventive Medicine*, 26, 17–26. <https://doi.org/10.32782/2786-9067-2023-26-2>. [in Ukrainian].
8. Kropyvnytska, L., Stadnichuk, O., Kucher, L., Sheremeta, O., & Platonov, M. (2022). Otsinka ekolohichnoho stanu poverkhnevyykh vod richky Opir [Assessment of the ecological state of the surface waters of the Opir River]. *Problemy khimii ta staloho rozvytku – Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 3, 49–58. <https://doi.org/10.32782/pcsd-2022-3-7>. [in Ukrainian].
9. Mudrak, O. V., Hanchuk, M. M., Skyba, V. P., Tsyhanov, I. V., & Hanchuk, K. O. (2024). Ekolohichnyi monitorynh rozvytku posushlyvykh protsesiv u Zaporizkii oblasti [Ecological monitoring of the development of arid processes in the Zaporizhzhia region]. *Zbalansovane pryrodokorystuvannia – Balanced Nature Management*, 4, 108–115. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2024.31940>. [in Ukrainian].
10. Nazarenko, O., Berezovska, A., Tymoshchuk, V., & Sherstiuk, Ye. (2024). Intehrovana systema monitorynhu vodnykh resursiv u strukturi ekolohichnoi bezpeky pivdnia Ukrainy [Integrated water resources monitoring system within the environmental security structure of southern Ukraine]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu – Scientific Bulletin of the National Mining University*, 3, 122–127. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-3/122>. [in Ukrainian].
11. Lishchenko, L., Tomchenko, O., & Mychak, A. (2025). Satellite data in the substantiation and creation of objects of the Nature Reserve Fund and monitoring of their ecological condition. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 12(3), 21–28. <https://doi.org/10.36023/ujsr.2025.12.3.287>
12. Kryvokhyzha, Ye., Kutia, M., Hrytsyk, O., Khmelianchyshyn, Yu., & Hlevaskyi, V. (2024). Applications of earth remote sensing for natural resource monitoring in Ukraine. *Nativa (Pesquisas Agrárias e Ambientais)*, 12(4), 744–754. <https://doi.org/10.31413/nat.v12i4.18355>
13. High-Level Working Group on the Environmental Consequences of the War. (2024, February). Assessing Environmental Damage in Ukraine. Input to an Environmental Compact for Ukraine: A Green Future. Recommendations for Accountability and Recovery. Retrieved from <https://ceobs.org/wp-content/uploads/2024/02/Assessing-Environmental-Damage-in-Ukraine.pdf>



Стаття надійшла 25.10.2025  
Стаття прийнята 21.11.2025  
Опубліковано 22.12.2025