

## МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ВОДНИХ РЕСУРСІВ В УМОВАХ АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Івашченко Т.Г., Печений В.Л., Яковлев І.О.

Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»  
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, м. Київ

Розглянуті методичні особливості моніторингу якості водних ресурсів в умовах зростаючого антропогенного навантаження. Актуальність теми обумовлена критичним станом водних екосистем внаслідок промислової діяльності, урбанізації та військових дій – факторів, що призвели до комплексного багатокomпонентного забруднення поверхневих вод. Сучасний стан водних ресурсів України, де зруйновано понад 500 об'єктів водогосподарської інфраструктури, не відповідають нормативним вимогам.

Критичні прогалини в існуючих системах моніторингу засвідчують недостатню інтеграцію методів біоіндикації з технічними системами спостереження, відсутність методологій для оцінки синергетичних ефектів багаторазового забруднення та неадекватність систем раннього попередження в умовах високого антропогенного навантаження.

Запропонована гібридна структура нагляду на основі автосенсорів гідрохімічних ознак, датчиків життя від знакових малих істот та установок перевірки цифрового зображення для судження щодо стану водного життя. Розроблено спосіб означення стану якості води, враховуючи суміш багатьох видів бруду на основі теорії рівності шкідливих речовин, що дає змогу підрахувати ефективність об'єднання й боротьби брудних елементів. Методика оцінки якості води з урахуванням взаємодії різних типів забруднюючих речовин на основі теорії токсичних еквівалентів дозволяє кількісно оцінити синергетичну та антагоністичну дію забруднюючих речовин. Представлено систему раннього попередження з використанням мережі автономних станцій моніторингу, алгоритмів машинного навчання для виявлення аномалій та моделей прогнозування поширення забруднення. Система адаптивного моніторингу автоматично збільшує частоту спостережень та виявлення відхилень від нормативних значень, а штучні нейронні мережі ідентифікують ранні ознаки кризових ситуацій.

Запропоновані рішення забезпечують економічну ефективність за рахунок скорочення витрат на реагування на надзвичайні ситуації та відновлення екосистеми шляхом своєчасного виявлення загроз для навколишнього середовища. *Ключові слова:* водні ресурси, екологічна катастрофа, екологічний моніторинг, екологічна безпека.

**Methodological aspects of water resource quality monitoring under anthropogenic pressure. Ivashchenko T., Pechenyi V., Yakovlev I.**

The article is devoted to the consideration of methodological aspects of monitoring the quality of water resources in conditions of growing anthropogenic load. Its relevance is due to the critical state of aquatic ecosystems as a result of industrial activity, urbanization, and military actions – factors that have led to complex multicomponent pollution of surface waters. The current state of water resources in Ukraine, where more than 500 water management infrastructure facilities have been destroyed, does not meet regulatory requirements. Critical gaps in existing monitoring systems include insufficient integration of bioindication methods with technical observation systems, lack of methodologies for assessing the synergistic effects of multiple pollution, and inadequacy of early warning systems in conditions of high anthropogenic pressure. A hybrid surveillance structure is planned, based on auto-sensors of hydrochemical characteristics, life sensors from iconic small creatures, and digital image verification installations to assess the state of aquatic life. A method has been developed to assess water quality, taking into account a mixture of many types of pollution based on the theory of equal harmful substances. This allows us to calculate the effectiveness of combining and combating dirty elements. The method of assessing water quality, taking into account the interaction of different types of pollutants based on the theory of toxic equivalents, allows us to quantitatively assess the synergistic and antagonistic effects of pollutants. An early warning system is presented using a network of autonomous monitoring stations, machine learning algorithms for anomaly detection, and pollution spread prediction models. The adaptive monitoring system automatically increases the frequency of observations when deviations from normative values are detected, and artificial neural networks identify early signs of crisis situations. The proposed solutions ensure economic efficiency by reducing the cost of responding to emergencies and restoring the ecosystem through the timely detection of threats to the environment. *Key words:* water resources, ecological disaster, ecological monitoring, ecological safety.

**Постановка проблеми.** Погіршення якості води внаслідок активізації антропогенної діяльності є однією з головних екологічних проблем сучасності. Як повідомляє програма моніторингу Цілей сталого розвитку ООН, у 2024 року 2,2 мільярда людей не матимуть доступу до безпечного водопостачання, а 3,4 мільярда людей не матимуть безпечно керованої санітарії [1, 2]. За даними UN-Water, у 2022 році 42% побутових стічних вод не очища-

лися достатньою мірою перед скиданням, що становило приблизно 113 мільярдів м<sup>3</sup> неочищених або недостатньо очищених побутових стічних вод [3]. Світові дослідження свідчать, що 48% усіх стічних вод скидається в поверхневі водойми без будь-якої очистки, що критично порушує екологічний баланс гідроекосистем [4].

Водні ресурси України характеризуються особливо високим рівнем антропогенного наванта-

ження. Дані Державного агентства водних ресурсів України свідчать, що за основними показниками якості води у більшості водних об'єктів не відповідає нормативним вимогам. Ситуація ускладнюється наслідками повномасштабної військової агресії РФ проти України, що триває майже шість років, – російські війська знищили понад 500 об'єктів водної інфраструктури та пошкоджено 39 700 кілометрів водних мереж, що призвело до порушення функціонування систем екологічного моніторингу [5, 6].

**Актуальність дослідження.** Сучасний стан водного господарства окреслений істотним погіршенням якості водних ресурсів як наслідок посилення антропогенного навантаження та військових дій. Моніторинг, пов'язаний з ефективним контролем якості води, є найважливішим з точки зору екологічної безпеки та сталого розвитку. Актуальність дослідження, спрямованого на розробку методів моніторингу якості води в умовах антропогенного навантаження, зумовлена комплексом взаємопов'язаних факторів наукової, практичної та соціальної сфер.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Дослідження спрямоване на вирішення науково-практичних завдань в галузі екологічного моніторингу водних ресурсів. З точки зору науки, це методологічна проблема, яка не має достатньо розроблених теоретичних засад комплексного моніторингу якості води в умовах наявності багатьох джерел антропогенного впливу. Зокрема, необхідно систематизувати існуючі підходи до контролю якості води, визначити прогалини в традиційних методах спостереження та сформулювати концептуальні принципи інтеграції методів біоіндикації з дистанційними технологіями.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сфера моніторингу якості води наразі характеризується активним розвитком інноваційних технологічних рішень і методологічних підходів. Дослідження описують сплеск у застосуванні технологій машинного навчання та IoT для досягнення кінцевої мети – моніторингу якості води. Вчені, намагаючись об'єднати різні системи датчиків, з'ясували, що 30,9 мільярдів підключених пристроїв до 2025 року у всьому світі створює нові можливості для розвитку систем моніторингу якості води. Науковці наголошують на подальшій оцінці існуючих технологічних рішень щодо практичних проблем, що перешкоджають масштабуванню та розробці автоматизованих систем контролю [7, 8].

Останні дослідження підкреслюють складність створення узгоджених баз даних якості поверхневих вод на глобальному рівні. Вчені зібрали найбільшу базу даних за 1940–2023 роки, яка містить 2,82 мільйона вимірювань восьми параметрів якості води. Автори пропонують уніфікувати підходи до збору та опрацювання гідроекологічних даних. Такі дослідження порівнюють ефективність традицій-

них і сучасних методів моніторингу за різних умов їх застосування. Автори обґрунтовують переваги систем IoT у забезпеченні виявлення забруднень у реальному часі порівняно з лабораторними методами [9, 10].

Наукові роботи засвідчують перспективність впровадження пристроїв IoT з постійним моніторингом віддалених локацій. Дослідники визначають передові технології дистанційного зондування як один із перспективних напрямків у розвитку систем контролю навколишнього середовища. Автори докладно зупиняються на проблемах забезпечення точності вимірювань недорогих датчиків і акцентують увагу на проблемах надійності обладнання в різних умовах експлуатації. Вчені обґрунтовують свою аргументацію щодо стандартизації методів калібрування та протоколів тестування, тим самим обґрунтовуючи уніфікований підхід до протоколів тестування [11, 12].

Автори припускають, що можна передбачити зміни якості води з високим ступенем точності за допомогою аналізу часових рядів на основі нейронної мережі. Вчені підтверджують ефективність застосування інтеграції різних факторів навколишнього середовища в моделі машинного навчання та підкреслюють перспективи застосування ШІ для раннього виявлення забруднення [13, 14].

Глобальна ситуація з якістю водних ресурсів погіршується, експерти вказали, що незадовільна якість водних об'єктів зменшилася з 57% у 2017 році до 56% у 2023 році. Таким чином, це дослідження виступає за посилення міжнародної координації зусиль щодо моніторингу водних ресурсів [15].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Незважаючи на значний прогрес, аналіз літератури виявляє кілька критичних прогалин: інтеграція підходів біоіндикації з технічними системами моніторингу не була запроваджена належним чином; комплексні методології для оцінки синергетичних ефектів багаторазового забруднення відсутні; відсутність ефективної системи раннього попередження в умовах, діагностованих як високе антропогенне навантаження.

**Викладення основного матеріалу.** На основі виявлених критичних прогалин у сучасній системі моніторингу якості води представлено комплексний підхід до вирішення трьох ключових проблем: інтеграція методів біоіндикації з технічними системами, розробка методології оцінки синергетичних ефектів множинного забруднення та створення ефективних систем раннього попередження.

Традиційні системи моніторингу якості води базуються переважно на фізико-хімічних показниках, тому не дають повної оцінки екологічного стану вод. Методи біоіндикації дозволяють визначити комплексний вплив забруднення на біоту; однак широке застосування таких методів стримується

труднощами стандартизації та великою суб'єктивністю в інтерпретації результатів.

Запропонований підхід передбачає створення гібридної системи моніторингу, що поєднує:

- автоматизовані датчики основних гідрохімічних параметрів (рН, розчинений кисень, електропровідність, каламутність);
- біосенсори на основі мікроорганізмів-індикаторів для виявлення токсичних речовин;
- цифрові системи аналізу зображень для оцінки стану макрофітів та фітопланктону.

Головною перевагою такої інтеграції є можливість отримання в режимі реального часу цілісної картини екологічного стану водойми. Технічні датчики забезпечують постійний контроль основних параметрів, а сигнали біоіндикації виконують два завдання: по-перше, вони сигналізують про наявність певних токсикантів; по-друге, свідчать про порушення функцій екосистеми.

Оскільки сучасні водні екосистеми стикаються з множинними джерелами забруднення, що призводить до складного злиття різних забруднюючих речовин, традиційні методи оцінки якості води, засновані на аналізі окремих компонентів, не враховують синергізм і антагонізм між взаємодіючими забруднювачами. Пропонується методика оцінки якості води, яка враховує взаємодію між різними типами забруднюючих речовин. Ця методика включає в себе:

- математичні моделі ефектів взаємодії забруднюючих речовин на основі теорії токсичних еквівалентів;
- індекси комплексного забруднення, що відображають як адитивні, так і неадитивні ефекти;
- алгоритми ідентифікації критичних комбінацій забруднюючих речовин;
- системи прогнозування екологічного ризику від багаторазового забруднення.

Методологія спирається на концепцію, відому як токсичне навантаження, яка дозволяє кількісно оцінити загальний вплив різних типів забруднюючих речовин, враховуючи їх взаємний вплив. Для цього на основі біотестування та математичного моделювання виводяться коефіцієнти синергізму/антагонізму.

Своєчасне виявлення ризиків та своєчасне реагування на критичні ситуації є факторами якісного

управління водними ресурсами. Пропонується система раннього попередження, яка включатиме:

- мережу автономних станцій моніторингу з бездротовою передачею даних;
- алгоритми машинного навчання для виявлення аномальних змін параметрів води;
- моделі прогнозування поширення забруднення з урахуванням гідродинамічних характеристик.

Система адаптивного моніторингу працюватиме за принципом автоматичного збільшення частоти спостережень при виявленні відхилення від нормативних значень для детального відстеження динаміки процесів. Штучні нейронні мережі використовуватимуться для розпізнавання складних закономірностей у зміні якості води, що є передвісниками виникнення кризової ситуації.

Запропонований економічно ефективним, оскільки дозволить скоротити витрати на реагування на надзвичайні ситуації та відновлення екосистем за рахунок своєчасного виявлення та попередження екологічних інцидентів.

**Висновки.** Проведені дослідження дозволили сформулювати загальний підхід до розв'язання існуючих проблем моніторингу якості водних ресурсів в умовах антропогенного навантаження. Обґрунтовано необхідність переходу від традиційних систем моніторингу виключно за фізико-хімічними показниками до комплексних підходів, що поєднують технічні засоби з методами біоіндикації. Гібридна система моніторингу дає змогу отримати повну картину екологічного стану водойми в режимі реального часу. Методика оцінки синергетичних ефектів множинного забруднення на основі теорії токсичних еквівалентів, яка, окрім адитивної, має також неадитивні взаємодії між забруднювачами. Система раннього попередження з використанням технологій машинного навчання та IoT здатна забезпечувати своєчасне виявлення аномальних змін у параметрах водного середовища, а також прогнозувати поширення забруднення з урахуванням гідродинамічних характеристик водойм.

Сфери подальших досліджень передбачають стандартизацію процедур калібрування біосенсорів та розробку інтегрованих баз даних для обробки різних типів інформації.

### Література

1. UN Statistics Division. SDG Report 2025 Goal 6. URL: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2025/Goal-06/> (дата звернення: 11.08.2025).
2. UNICEF. Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2024. URL: <https://data.unicef.org/resources/jmp-report-2025/> (дата звернення: 11.08.2025).
3. UN-Water. Progress on Wastewater Treatment – 2024 Update. URL: <https://www.unwater.org/publications/progress-wastewater-treatment-2024-update> (дата звернення: 11.08.2025).
4. Jones, N.E., Meijer, D., Meijer, L.M. Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse. *Earth System Science Data*, 2021, № 13, P. 237–254.
5. UNICEF. The water we leave behind: securing Ukraine's Climate resilient future. URL: <https://www.unicef.org/ukraine/en/blog/water-we-leave-behind-securing-ukraines-climate-resilient-future> (дата звернення: 30.08.2025).

6. EU4Environment (2024). The toll of two years of war on water: Damage and needs assessment in Ukraine's water sector. URL: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2025/765769/EPRS\\_STU\(2025\)765769\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2025/765769/EPRS_STU(2025)765769_EN.pdf) (дата звернення: 30.08.2025).
7. Essamlali I, Nhaila H, El Khaili M. Advances in machine learning and IoT for water quality monitoring: A comprehensive review. *Heliyon*. 2024. № 10(6). e27920. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e27920.
8. Miller M, Kisiel A, Cembrowska-Lech D, Durlak I, Miller T. IoT in Water Quality Monitoring-Are We Really Here? *Sensors (Basel)*. 2023. № 23(2). 960. doi: 10.3390/s23020960.
9. Karim, M.R., Syeed, M.M.M., Rahman, A. A Comprehensive Dataset of Surface Water Quality Spanning 1940-2023 for Empirical and ML Adopted Research. *Sci Data*. 2025, № 12, 391. DOI: 10.1038/s41597-025-04715-4
10. Zainurin SN, Wan Ismail WZ, Mahamud SNI, Ismail I, Jamaludin J, Ariffin KNZ, Wan Ahmad Kamil WM. Advancements in Monitoring Water Quality Based on Various Sensing Methods: A Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health*. 2022. № 19(21):14080. DOI: 10.3390/ijerph192114080.
11. Jaywant SA, Arif KM. Remote Sensing Techniques for Water Quality Monitoring: A Review. *Sensors (Basel)*. 2024. № 24(24):8041. DOI: 10.3390/s24248041.
12. de Camargo ET, Spanhol FA, Slongo JS, da Silva MVR, Pazinato J, de Lima Lobo AV, Coutinho FR, Pfrimer FWD, Lindino CA, Oyamada MS, Martins LD. Low-Cost Water Quality Sensors for IoT: A Systematic Review. *Sensors (Basel)*. 2023. № 23(9):4424. DOI: 10.3390/s23094424.
13. Popescu S. M., Mansoor S., Wani O. A., Kumar S. S., Sharma V., Sharma A., Arya V. M., Kirkham M. B., Hou D., Bolan N., Chung Y. S. Artificial intelligence and IoT driven technologies for environmental pollution monitoring and management. *Frontiers in Environmental Science*. 2024. № 12. 1336088. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1336088.
14. Izah Sylvester Chibueze, Ogwu Matthew Chidozie. Modeling solutions for microbial water contamination in the global south for public health protection. *Frontiers in Microbiology*. 2025. № 16. DOI:10.3389/fmicb.2025.1504829.
15. Progress on Ambient Water Quality – 2024 Update. URL: <https://www.unwater.org/publications/progress-ambient-water-quality-2024-update> (дата звернення: 08.09.2025).

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025