

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-83-11>

УДК 621.317

МАРКІН Максим

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-7266-5525>

e-mail: m.markin@kpi.in.ua

ПЕТРОВ Віталій

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

e-mail: stabilno@gmail.com

ШЛЯХИ ВПРОВАДЖЕННЯ ШІ У МОНІТОРИНГ ТА КОНТРОЛЬ ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ

У статті розглянуто сучасні підходи до впровадження штучного інтелекту (ШІ) в системи моніторингу та контролю водних середовищ. Актуальність дослідження зумовлена зростанням антропогенного навантаження, появою нових типів забруднень, обмеженістю традиційних лабораторних методів і складною екологічною ситуацією в Україні, що загострилася в умовах воєнних дій.

У роботі проаналізовано існуючі методи контролю складу води — фізико-хімічні, спектроскопічні, акустичні, біологічні та інтелектуальні. Наведено їхні переваги, обмеження та приклади практичної реалізації на базі інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) із використанням сенсорів, мікроконтролерів і хмарних технологій. Показано можливості застосування ШІ для автоматизованої обробки даних, виявлення аномалій, класифікації типів забруднення та прогнозування критичних змін параметрів води. Особливу увагу приділено створенню гнучких і масштабованих ІВС, здатних інтегрувати дані з різних джерел (сенсорні мережі, супутники, лабораторні дослідження) та працювати з великими масивами інформації. Запропоновано архітектуру системи, яка включає сенсорний рівень, комунікаційні шлюзи, центральний сервер і аналітичний модуль із нейромережевими алгоритмами (LSTM, Autoencoder, класифікаційні моделі).

Результати дослідження підкреслюють ефективність поєднання традиційних методів контролю з інтелектуальними алгоритмами для підвищення точності, швидкості та адаптивності моніторингу. Використання ШІ дозволяє здійснювати діагностику забруднення на ранніх етапах, формувати системи раннього попередження, прогнозувати динаміку стану водних ресурсів та підтримувати прийняття управлінських рішень. Таким чином, запропоновані підходи демонструють перспективність впровадження ШІ в моніторинг водного середовища та створюють підґрунтя для розвитку інтелектуальних екологічних систем, здатних забезпечити сталий розвиток, охорону здоров'я населення й збереження екосистем.

Ключові слова: штучний інтелект, контроль складу води, інформаційно-вимірювальна система, моніторинг, методи аналізу, водне середовище, вимірювання.

MARKIN Maksym, PETROV Vitaliy

National Technical University of Ukraine «Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

WAYS OF IMPLEMENTING AI IN MONITORING AND CONTROL OF AQUATIC ENVIRONMENTS

The article considers modern approaches to the implementation of artificial intelligence (AI) in water environment monitoring and control systems. The relevance of the study is due to the growth of anthropogenic load, the emergence of new types of pollution, the limitations of traditional laboratory methods and the difficult environmental situation in Ukraine, which has worsened in the context of military operations.

The paper analyzes existing methods for monitoring water composition - physicochemical, spectroscopic, acoustic, biological and intellectual. Their advantages, limitations and examples of practical implementation based on information and measuring systems (IMS) using sensors, microcontrollers and cloud technologies are presented. The possibilities of using AI for automated data processing, anomaly detection, classification of pollution types and forecasting of critical changes in water parameters are shown. Special attention is paid to the creation of flexible and scalable IMS capable of integrating data from various sources (sensor networks, satellites, laboratory studies) and working with large amounts of information. The system architecture is proposed, which includes a sensor layer, communication gateways, a central server and an analytical module with neural network algorithms (LSTM, Autoencoder, classification models).

The results of the study emphasize the effectiveness of combining traditional control methods with intelligent algorithms to increase the accuracy, speed and adaptability of monitoring. The use of AI allows for early diagnosis of pollution, the formation of early warning systems, the prediction of the dynamics of the state of water resources and the support of management decision-making. Thus, the proposed approaches demonstrate the prospects for the implementation of AI in water environment monitoring and create a basis for the development of intelligent ecological systems capable of ensuring sustainable development, public health protection and ecosystem preservation.

Keywords: artificial intelligence, water composition control, information and measurement system, monitoring, analysis methods, water environment, measurement.

Стаття надійшла до редакції / Received 24.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.08.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Контроль якості води є одним з найважливіших завдань у забезпеченні екологічної безпеки, охорони здоров'я та сталого розвитку суспільства. У зв'язку зі зростанням рівня антропогенного навантаження на водні об'єкти, та збільшенням забруднення мікропластиком, пестицидами, фармацевтичними препаратами та наночастинками виникає потреба у впровадженні ефективних інформаційно-вимірювальних систем, що дозволяють здійснювати оперативний та безперервний моніторинг складу води в режимі реального часу. Це в свою чергу надає можливість ефективно управляти водними ресурсами, виявляти вчасно джерело забруднення екосистем та запобігати поширенню таких забруднень.

Сучасні виклики включають появу нових видів забруднення, необхідність швидких вимірювань та обмежені ресурси традиційних лабораторій, що вимагає модернізованих підходів до моніторингу води. Для України, екологічний моніторинг водного середовища став особливим та ще актуальнішим через війну, ракети та бомби, спалені міста та виробництва. Велика кількість забруднень пов'язаних з війною, таких як реактивне паливо для ракет, різними видами пороху, різними видами хімічної зброї, яку використовують проти України на території України, зруйнованим та пошкодженим виробництвом чи складами промислових товарів є такими речовинами, які не були притаманними складовими у водоймах України. Ця проблематика актуалізує розробку швидких засобів вимірювання з більшою кількістю хімічних речовин, що потребує розробки та побудови інтегрованих систем, так як кожна речовина та її концентрація може визначатись у різний спосіб. Це стає можливим завдяки швидкій обробці результатів вимірювання використовуючи нові можливості ШІ.

Тема контролю складу води охоплює велику кількість технічних, екологічних та соціальних викликів, які суттєво ускладнюють ефективне управління водними ресурсами. До основних аспектів проблеми належать:

1. Антропогенне навантаження і його зростання. Наявність постійних обстрілів над більшою частиною території України та руйнування промислових та житлових районів, індустріалізація, урбанізація, погано контрольоване сільське господарство, гірничодобувна промисловість та, звичайно ж, побутові скиди призводять до постійного надходження нових забруднюючих речовин у водойми. Це вимагає адаптації існуючих систем моніторингу до новітніх видів забруднення, таких як паливо, мастила, мікропластик, фармацевтичні препарати, пестициди та важкі метали.

2. Недостатність технічного оснащення систем контролю. Багато країн, включаючи Україну, і досі застосовують ручний відбір проб з подальшою лабораторною обробкою, як метод аналізу. Це пов'язано з тим, що в деяких водоймах немає необхідного устаткування для постійного моніторингу забруднення води. Аргументацією у використанні такого методу часто є економія фінансування, але він не дає можливості здійснювати моніторинг у режимі реального часу та оперативно реагувати на надзвичайні ситуації.

3. Обмеження доступу до актуальних даних. Інформація про якість води розпорошена між різними інстанціями (Таблиця 1, 2) які не є уніфікованими чи систематизованими. Така інформація не оновлюється оперативно. Відсутність єдиної системи даних часто ускладнює прийняття управлінських рішень.

Таблиця 1

Центральні органи регулювання та контролю за водним середовищем в Україні

Інстанція	Функції
Міндовкілля (Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України) [1]	Формує політику у сфері охорони водних ресурсів, координує екологічний моніторинг, відповідає за цифровізацію екологічних даних [2]
Державна екологічна інспекція України (ДЕІ) [3]	Здійснює державний нагляд за дотриманням вимог щодо охорони вод, проводить перевірки, складає акти, накладає санкції [4]
Державне агентство водних ресурсів України (ДАВР)	Веде облік водокористування, координує басейнові управління, забезпечує гідрологічний моніторинг
Центр громадського здоров'я МОЗ України	Відповідає за санітарно-гігієнічний контроль якості питної води, проводить лабораторні дослідження
Держпродспоживслужба	Контролює безпеку води для споживання, здійснює санітарно-епідеміологічний нагляд

В Україні існують електронні платформи для пошуку та обміну даними:

– ЕкоСистема – національна онлайн-платформа для збору, обробки та публікації екологічних даних (включно з водою).

- Трембіта – система міжвідомчого обміну даними між державними реєстрами та інформаційними системами [5].
- Портал відкритих даних України – публікація екологічних масивів даних, доступних для громадськості.
- Формати обміну:
- Машиночитані формати: JSON, XML, CSV (лише 40% даних доступні в такому вигляді).
- Регулярна звітність: щоквартальні та щорічні звіти між регіональними та центральними органами.
- Інтеграція з Європейськими системами: через ENI SEIS II East – екологічна інформаційна система ЄС.

Таблиця 2

Регіональні та місцеві структури регулювання та контролю за водним середовищем в Україні

Рівень	Приклади	Функції
Обласні управління екології	Київське, Львівське, Харківське	Збір даних, взаємодія з ДЕІ, участь у регіональних програмах
Басейнові управління водних ресурсів	Дніпровське, Південнобузьке, Сіверсько-Донецьке	Моніторинг водних об'єктів, передача даних до ДАВР
Лабораторії санітарного контролю	Обласні лабораторні центри МОЗ	Аналіз проб води, звітування до Центру громадського здоров'я
Міські водоканали та комунальні служби	Київводоканал, Львівводоканал	Внутрішній контроль якості води, передача даних до місцевих органів

До вже існуючих проблем можна віднести недостатню узгодженість нормативної бази (це понад 300 актів, часто дублюються або суперечать один одному) та фрагментованість даних – різні формати. Перспективи та плани - це створення порталу «Відкрите довкілля», як єдиної точки доступу до екологічної інформації.

4. Невідповідність методів сучасним умовам. Стандарти та нормативи часто не «відповідають» сучасним викликам. Наприклад, гранично допустимі концентрації (ГДК) можуть не враховувати кумулятивний ефект нових токсичних речовин (Таблиця 3).

Таблиця 3

Пояснення суті гранично допустимих концентрацій

Аспект	Пояснення
Посилання для оцінювання	Значення ГДК дозволяють визначити, чи є вода безпечною, умовно придатною або небезпечною для певного типу використання
Порогове значення	Перевищення ГДК сигналізує про забруднення та необхідність втручання (очищення, обмеження скидів, штрафи тощо)
Вибір методів	Методи аналізу вибираються з точністю, яка дозволяє їм виявляти речовини на рівні їх ГДК або нижче
Нормативно-правова база	ГДК регулюються державними та міжнародними стандартами (санітарними правилами та нормами, ДСТУ [6], [7] директивами ЄС) [8], [9]
Стандартизація результатів	Дані вимірювань порівнюються саме з ГДК, що дозволяє уніфікувати результати та висновки незалежно від місця контролю чи лабораторії

5. Зміна клімату та зміна гідрологічних режимів, посухи, повені або аномальні опади змінюють властивості поверхневих і підземних вод, ускладнюють планування контролю та вимагають динамічного підходу при розробці сценаріїв прогнозування.

6. Проблема інтеграції ШІ і цифрових технологій показує необхідність поєднання інформації про моніторинг та контроль за концентраціями різних речовин у воді з різних джерел (сенсорів, супутників, лабораторій), що вимагає стандартизації, створення цифрових платформ та впровадження штучного інтелекту для інтерпретації великих обсягів даних. Ці проблеми обґрунтовують необхідність створення інноваційних інформаційно-вимірювальних систем, модернізації підходів до контролю складу води та міждисциплінарного підходу до вирішення проблем якості води. Отже, в контексті цифровізації екосистем пріоритетом є не лише

вимірювання окремих параметрів, а й створення інтелектуальних систем моніторингу з інтеграцією Інтернету речей, хмарних технологій та машинного навчання з використанням геоаналітики. Дослідження та порівняння існуючих методів дозволяє впроваджувати покращення для обробки даних, швидко реагувати на зміни та готуватися до ускладнень, якщо такі виникнуть.

Отже, проблема контролю складу та якості водних середовищ має комплексний характер і поєднує екологічні, технічні та соціальні аспекти. Зростання антропогенного навантаження, поява нових типів забруднень, а також воєнні фактори, що спричинили значне хімічне навантаження на водойми України, зумовлюють необхідність переходу від традиційних лабораторних методів до сучасних інформаційно-вимірювальних систем. Недостатність оперативних даних, фрагментарність екологічної інформації та невідповідність нормативної бази сучасним умовам ускладнюють ефективне управління водними ресурсами. У цьому контексті впровадження інтелектуальних систем моніторингу з використанням штучного інтелекту, хмарних технологій та Інтернету речей стає ключовим науковим і практичним завданням, що здатне забезпечити своєчасне виявлення небезпечних змін, прогнозування критичних ситуацій та підтримку прийняття рішень на державному та регіональному рівнях.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Сучасні дослідження у сфері моніторингу водних середовищ демонструють тенденцію до переходу від традиційних лабораторних методів до автоматизованих систем збору та аналізу даних. У працях [10], [11], [12] підкреслюється, що контроль якості води не може обмежуватися лише визначенням базових фізико-хімічних параметрів (рН, температура, розчинений кисень, БПК, ХСК), адже зростає необхідність виявлення мікропластику, наночастинок та залишків фармацевтичних препаратів, які становлять нові екологічні загрози.

Важливою складовою сучасних підходів є використання сенсорних мереж та бездротових технологій передачі даних (LoRaWAN, NB-IoT), що дозволяють забезпечити безперервний моніторинг навіть у важкодоступних регіонах [13]. Дослідники також відзначають перспективність застосування комп'ютерного зору та дронів для виявлення поверхневих забруднень, а також гіперспектральної візуалізації, яка дає змогу виявляти широкий спектр органічних і неорганічних речовин у воді. Наприклад, замість обмежених лабораторних методів, більш актуальним є розгортання розподілених сенсорних мереж, таких як датчики на основі LoRaWAN/NB-IoT для важкодоступних регіонів, використання аналізу зображень (комп'ютерного зору) та дронів для моніторингу забруднення поверхні. Також до актуальних методів належать використання гіперспектральної візуалізації, модулі автоматичного калібрування та самообслуговування.

До автоматизованих системи моніторингу належать сенсорні платформи, що можуть житися від сонячних панелей та забезпечувати безперервний збір даних у режимі реального часу. Хмарна платформа обробки (наприклад, Azure IoT Hub або AWS IoT Core) може забезпечувати аналітику даних, аналіз тенденцій та прогнозування за допомогою нейронних мереж (таких як LSTM для прогнозування забруднення). Діагностика за допомогою штучного інтелекту може використовуватися для розпізнавання типів забруднення на основі моделей розсіювання світла, а також для виявлення аномалій та створення систем раннього попередження через інтерфейси, такі як мобільні додатки для моніторингу в режимі реального часу та геоінформаційні панелі з інтерактивною візуалізацією (на основі QGIS/ArcGIS або ГІС з відкритим кодом).

Значну увагу в публікаціях приділено розвитку інтелектуальних інформаційно-вимірювальних систем, які інтегрують різні методи збору даних (сенсори, супутники, лабораторні дослідження) та застосовують алгоритми штучного інтелекту для їх обробки. Використання нейронних мереж (зокрема LSTM) забезпечує прогнозування змін у складі води, тоді як автокодері (Autoencoder) дозволяють виявляти аномалії й відхилення від нормальних параметрів [14].

Окремі дослідження [15], [16] зосереджені на методах біоіндикації, що базуються на реакції водних організмів на зміну якості середовища. Цей підхід дає змогу фіксувати інтегральний вплив сукупності забруднень, навіть якщо їх концентрація окремо не перевищує гранично допустимих норм. Поряд із цим, активно розвиваються системи оцінки токсичності з використанням біотестування та цитогенетичних методів, що дозволяє виявляти приховані загрози для екосистем і здоров'я людини.

Наведемо узагальнені таблиці з вже існуючими методами контролю та моніторингу складу води. Методи моніторингу складу води. Методи моніторингу складу води традиційно класифікуються на фізичні, хімічні та біологічні. Фізичні методи включають вимірювання температури, каламутності, кольору, електропровідності тощо. Хімічні методи оцінюють концентрацію розчинених речовин, таких як солі, метали, нітрати [17], фосфати та хлориди. Серед них найпоширенішими методами є фотометричний, титриметричний та електрохімічний аналіз. Біологічні методи зосереджені на аналізі біоіндикаторів або застосуванні біосенсорів (Таблиця 4).

Ми проаналізували та порівняли сучасні методи та засоби контролю забруднення поверхневих [18] та підземних вод (Таблиця 5, 6) на прикладі 2020–2025 рр.

Таблиця 4.

Методи контролю складу води

Методи	Принцип та переваги	Приклад та суть побудови IBC
Фізико-хімічні методи	Принцип: пряме вимірювання параметрів води (рН, ЕС, DO, мутність) Переваги: простота, доступність, швидкий результат	Arduino/ESP32 + набір сенсорів + SD-карта або Wi-Fi
Спектроскопічні методи	Принцип: аналіз спектру поглинання/відбиття світла Переваги: виявлення органіки, важких металів, ПАР	AS7265x + ESP32 + ML-модель класифікації
Акустичні/ультразвукові методи	Принцип: аналіз відбитих сигналів у водному середовищі Переваги: безконтактність, можливість оцінки загальної концентрації домішок	Ультразвуковий сенсор + мікроконтролер + алгоритм реверберації
Біологічні методи (біоіндикація)	Принцип: аналіз реакції біоти на якість води Переваги: оцінка екологічного стану	Камера + неймережа для класифікації зображень
Інтелектуальні методи	Принцип: обробка даних за допомогою AI/ML Переваги: прогнозування, адаптація до змін середовища	Хмарна платформа + сенсори + алгоритми класифікації/регресії

Таблиця 5

Основні методи для аналізу підземних вод

Метод для аналізу підземних вод	Опис методу	Причина використання
Гідрогеохімічний аналіз	Визначення мінералізації, складу іонів, газів, мікроелементів	Підземні води мають стабільний склад, але можуть містити глибокі мінерали, солі, гази (радон, метан)
Геофізичні методи	Електророзвідка, акустична розвідка, магнітна та радіоактивна діагностика	Дозволяє виявити водоносні горизонти, оцінити глибину, структуру порід без буріння А
Ізотопний аналіз	Вивчення ізотопів водню, кисню, вуглецю	Допомагає визначити походження води, її вік, джерела живлення
Бурові та дослідно-фільтраційні роботи	Відкачування, дослідження дебіту, фільтраційних властивостей порід	Необхідні для оцінки запасів, експлуатаційних характеристик
Гідродинамічне моделювання	Прогноз режиму руху води, баланс водоносних горизонтів	Дозволяє оцінити вплив техногенних факторів, прогнозувати зміни рівнів

Таблиця 6

Основні методи для аналізу поверхневих вод

Метод для аналізу поверхневих вод	Опис методу	Причина використання
Фізико-хімічний аналіз	Визначення рН, температури, електропровідності, мутності, розчиненого кисню	Параметри швидко змінюються під впливом зовнішніх факторів (сонце, дощ, стоки)
Біологічний моніторинг	Аналіз фітопланктону, зоопланктону, сапробності, біоіндикація	Біота чутливо реагує на забруднення, дозволяє оцінити екологічний стан
Хімічний аналіз забруднювачів	Визначення важких металів, ПАР, нафтопродуктів, нітратів, фосфатів	Поверхневі води найбільш вразливі до антропогенних впливів (стоки, промисловість)
Гідроморфологічний моніторинг	Оцінка течії, глибини, ширини, руслових змін	Впливає на самоочищення води, біотоппи, ерозійні процеси
Операційний та діагностичний моніторинг	Збір даних за басейновим принципом, оцінка екологічних цілей	Дозволяє виявити ризики недосягнення стандартів якості води

Ми проаналізували та порівняли методи аналізу підземних, [19] та наземних вод, результат наведено (Таблиця 7)

Таблиця 7

Порівняльна таблиця методів аналізу підземних та наземних вод

Метод	Підземні води	Поверхневі води	Причина застосування
Гідрогеохімія	так	так	Склад води, мінерали
Геофізика	так	ні	Глибина, структура
Ізотопний аналіз	так	ні	Походження, вік води
Біоіндикація	ні	так	Екологічний стан
Хімічний аналіз ЗР	так	так	Забруднення
Гідроморфологія	ні	так	Фізичні характеристики
Буріння та фільтрація	так	ні	Запаси, дебіт

ГДК (гранично допустима концентрація) є ключовим поняттям у методах контролю якості води, що визначає максимально допустиму концентрацію певної речовини у воді, яка не завдає шкоди здоров'ю людини, а також водній флорі та фауні під час короточасного або тривалого впливу (Таблиця 8) відповідно до ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» [20] та ДСТУ 7525:2014 «Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості» [21].

Таблиця 8

Типові параметри та методи визначення в Україні

Речовина	Показник ГДК у питній воді	Метод визначення
Свинець	$\leq 0,01 \text{ мг/дм}^3$	Атомно-абсорбційна спектроскопія
Нітрати	$\leq 50 \text{ мг/дм}^3$	Іонна хроматографія, фотометрія
Загальне залізо	$\leq 0,3 \text{ мг/дм}^3$	Колориметрія, спектрофотометрія
БСК (біохімічне споживання кисню)	$\leq 3 - 6 \text{ мг/дм}^3$	Титрування, датчики розчиненого кисню (DO)
Нафтопродукти	$\leq 0,1 \text{ мг/дм}^3$	ІЧ-спектроскопія
Хлориди	$\leq 250 \text{ мг/дм}^3$	Аргентометричне титрування

Динамічні пороги ГДК мають залежність від сезону. ГДК (гранично допустима концентрація) – це максимальна кількість речовини у воді, яка не викликає негативного впливу на здоров'я людини або екосистему. У реальних умовах ГДК не є статичною величиною, тому і може змінюватися залежно від сезонних факторів (Таблиця 9) з прикладами динамічних порогів ГДК (Таблиця 10).

Таблиця 9

Зміни ГДК речовин у воді в залежності від сезону

Сезон	Причини зміни ГДК	Приклад впливу
Весна	Танення снігу, паводки, розбавлення концентрацій	Зниження концентрації нітратів, але підвищення мутності
Літо	Висока температура, цвітіння води, зниження рівня води	Підвищення концентрації аміаку, зниження кисню
Осінь	Активне розкладання органіки, зменшення біомаси	Зростання біогенних речовин (фосфати, нітрати)
Зима	Лід, зменшення фотосинтезу, застій води	Зниження кисню, накопичення CO_2 , NH_3

Таблиця 10

Приклади динамічних порогів ГДК речовин у воді

Речовина	ГДК (літо)	ГДК (зима)	Коментар
Аміак	0,5 мг/л	0,2 мг/л	Взимку токсичність вища через менший об'єм води
Розчинений кисень	>5 мг/л	>3 мг/л	Взимку допускається нижчий рівень
Фосфати	0,3 мг/л	0,1 мг/л	Влітку – активне цвітіння, тому поріг нижчий
Нітрати	45 мг/л	50 мг/л	Взимку – менше біологічного споживання

З наведених таблиць видно, що нормативи ГДК мають бути адаптивними до сезонних змін, особливо для поверхневих вод, де біологічна активність та гідрологічні умови змінюються щомісяця. Розглянуто Біоіндикацію – як метод оцінки якості води за реакцією живих організмів. Замість хімічного аналізу, спостерігають за станом біоти — від мікроорганізмів до риб. Основними принципами біоіндикації є: «Живі організми», що реагують на забруднення раніше, ніж це фіксують прилади, «Індикаторні види», що мають чітку межу толерантності до забруднень, «Сапробність» [22], як здатність води підтримувати життя при різному рівні органіки (Таблиця 11).

Таблиця 11

Методи біоіндикації

Метод	Опис	Приклад
Сапробна шкала	Визначення рівня органічного забруднення	Водорості, зоопланктон
Біотестування	Вивчення реакції організмів на воду	Дафнії, цибуля, редиска
Індикаторні види	Наявність/відсутність чутливих видів	Форель, поденки
Морфологічні зміни	Деформації, хлороз, пригнічення росту	Рослини, молюски
Цитогенетичні тести	Порушення клітинного поділу	Корінці цибулі, мікроорганізми

До переваги біоіндикації відносять: високу чутливість до низьких концентрацій забруднювачів, виявлення кумулятивного ефекту (накопичення), можливість довгострокового моніторингу, визначення екологічної небезпеки, а не лише хімічної присутності.

Знайдено оцінку загального токсичного впливу води як інтегральна оцінка здатності води викликати негативні біологічні ефекти у живих організмів (Таблиця 12). Враховується сукупна дія всіх забруднювачів, навіть якщо їх концентрації не перевищують ГДК окремо.

Таблиця 12

Методи оцінки загально токсичного впливу

Метод	Суть	Приклад
Біотестування	Вплив води на тест-організми (риби, дафнії, жаби)	Зміни в поведінці, смертність, порушення розвитку
Цитогенетичні тести	Аналіз клітинних аномалій	Мікроядра, подвійні ядра в еритроцитах <i>Danio rerio</i> [23]
Хронічна токсичність	Довготривалий вплив на репродуктивну функцію	Зниження плодючості дафній, мутації у жаб <i>Xenopus</i>
Імуноферментний аналіз	Виявлення токсинів (мікроцистини, нітрозаміни)	Оцінка впливу евтрофікації та «цвітіння» водоростей [24]

Існує кілька класів токсичності (таблиця 13). Визначення показника токсичності також є дуже важливим кроком, адже вода може бути прозорою та без запаху, але містити генотоксичні речовини (нітрати, пестициди, важкі метали), а також сумарна дія забруднювачів часто сильніша, ніж окремих компонентів. Визначення токсичності дозволяє виявити приховану загрозу, яку не видно при стандартному хімічному аналізі.

Таблиця 13

Класи токсичності

Індекс токсичності (TI)	Відношення ефекту до контрольного зразку
Клас токсичності: I	чиста вода
Клас токсичності: II	слабо забруднена
Клас токсичності: III	помірно токсична
Клас токсичності: IV	токсична
Клас токсичності: V	дуже токсична

До основні типи попереджень відносяться візуальні ознаки – це перші сигнали, які можна виявити без лабораторного аналізу (Таблиця 14). Вони часто вказують на наявність забруднення або порушення природного балансу.

Таблиця 14

Візуальні ознаки забрудненості води

Ознака	Можлива причина	Коментар
Каламутність	Зважені частинки, ерозія, органіка	Може перешкоджати дезінфекції. Може бути поверхнею для росту мікроорганізмів [25]
Зміна кольору	Залізо (жовтий), органіка (коричневий), водорості (зелений)	Показник хімічного або біологічного забруднення [26]
Запах	Сірководень, хлор, гниль, нафта	Шкала запаху: від 0 (немає) до 5 (дуже сильний)
Плівка на поверхні	Нафтопродукти, біологічне цвітіння	Може бути токсичною або алергенною
Піна	ПАР, органічні речовини	Часто свідчить про побутові або промислові стоки
Цвітіння води	Синьо-зелені водорості (мікроцистини)	Потенційно токсичне, викликає алергії та отруєння

Таким чином, аналіз останніх публікацій свідчить про зростаючу роль штучного інтелекту, хмарних технологій та Інтернету речей у моніторингу водних ресурсів. Їх застосування дозволяє поєднувати традиційні фізико-хімічні й біологічні методи з автоматизованими підходами, що забезпечує більш комплексну оцінку стану водних об'єктів, оперативне реагування на зміни та формування систем раннього попередження.

**ВИДІЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ,
КОТРИМ ПРИСВЯЧУЄТЬСЯ СТАТТЯ**

Попри значну кількість досліджень у сфері моніторингу водних середовищ, залишається низка проблемних аспектів, які перешкоджають створенню повноцінних, інтелектуальних та масштабованих систем контролю якості води.

Основною метою цієї роботи є пошук можливості створення інтелектуальної системи моніторингу водних середовищ, яка дозволяє виявляти органічні та неорганічні забруднювачі за допомогою спектрального аналізу і пришвидшує роботу інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) за рахунок впровадження глибокого навчання. Це має підвищити в майбутньому точність обробки експериментальних даних для вимірювання складу водних ресурсів на основі автоматизованого аналізу спектральних, фізико-хімічних даних та інших параметрів складу води з використанням методів глибокого навчання, а також її швидкість.

Завданнями дослідження були огляд та аналіз існуючих підходів та поглядів на сучасні методи моніторингу складу води [27], [28], дослідження можливості розробки інформаційно-вимірювальної системи з урахуванням аналізу даних з різних джерел та датчиків [29], [30], а також дослідження можливостей аналізу даних про склад води, визначення акценту на архітектурі, точності, гнучкості та можливості інтеграції з інтелектуальним алгоритмом [31], визначення технічних вимог до компонентів системи та датчиків [32].

До ключових особливостей гнучкості ІВС відноситься: модульність, масштабованість, універсальність інтерфейсів, адаптивність до середовища. Модульність, коли ІВС складається з окремих функціональних блоків: сенсорів, перетворювачів, контролерів, інтерфейсів, а кожен модуль може бути замінений або оновлений без зміни всієї системи. Масштабованість, забезпечує легке додавання нових

сенсорів або каналів збору даних та підтримку багатоканального вимірювання (паралельна або послідовно-паралельна структура). Універсальність інтерфейсів з підтримкою різноманітних стандартів: RS-485, USB, LoRaWAN, NB-IoT, Wi-Fi та сумісність з різними типами сенсорів: таких як pH, EC, DO, спектроскопічних чи акустичних. Адаптивність до середовища при автоматичному калібруванні в залежності від температури, тиску, мутності, з вибором методу вимірювання залежно від типу водного середовища.

До проблемних місць можна віднести те, що інформаційно-вимірювальні системи для контролю складу води часто виявляють недостатню гнучкість через:

- Технічну обмеженість із-за фіксованого налаштування сенсорів, коли більшість систем розраховані на певний набір параметрів (наприклад, pH, температура, електропровідність), і важко адаптуються до виявлення нових забруднень та обмежене оновлення ПЗ, коли програмне забезпечення не має модульної архітектури, щоб швидко додавати нові алгоритми або адаптуватися під зміну умов.

- Відсутність глобальної інтеграції, адже слабо пов'язані з іншими системами, де немає прямої взаємодії з GIS-системами або екологічними моделями, або ж немає підтримки стандартизованих протоколів, що ускладнює обмін даними між різними платформами.

- Економічні та ресурсні бар'єри, коли доволі висока вартість адаптивних рішень, адже розробка систем, які можуть гнучко змінюватися під різні типи води (прісна, морська, промислова) — дуже дорогий процес та Обмежене фінансування, що не завжди дає можливість модернізації.

- Людський фактор - коли є явна орієнтація на вузькі завдання: Системи створюються під конкретні цілі (наприклад, моніторинг питної води), а не як універсальні платформи або ж Нестача кадрів з міждисциплінарними знаннями: Наприклад, спеціаліст з хімічного аналізу води поки-що може не мати досвіду роботи з AI, який міг би зробити систему ще розумнішою.

Інтеграція з інтелектуальними алгоритмами. Неймережеві моделі призначені для використання штучних нейронних мереж для класифікації спектрів, прогнозування забруднень. Як приклад: моделі для розпізнавання органічних домішок за спектроскопічними даними. Експертні системи базуються на логічних правилах. Як приклад: база знань разом із логічними правилами надають автоматичне прийняття рішень. Наприклад, чи потрібно активувати фільтрацію за певних умов. Тут можливе навчання системи на основі історичних даних. Інтелектуальні сенсори, такі як сенсори з вбудованими алгоритмами обробки (наприклад Smart Radon Sensor, Bosch BME680) чи можливість визначення відхилень від норми в реальному часі. Хмарна аналітика, як передача даних на сервери для обробки інформації чи візуалізація, прогнозування, автоматичне сповіщення про аномалії.

Таким чином, невирішені раніше аспекти проблеми полягають у відсутності універсальних і гнучких інформаційно-вимірювальних систем, здатних поєднувати багатоканальні сенсорні мережі, штучний інтелект і хмарні технології для комплексного аналізу якості води. Саме на вирішення цих завдань спрямована дана стаття, яка пропонує шляхи інтеграції новітніх технологій у сфері екологічного моніторингу.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою статті є обґрунтування та розробка підходів до створення інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу та контролю водних середовищ із використанням штучного інтелекту. Основна увага зосереджена на поєднанні традиційних методів аналізу з алгоритмами глибокого навчання, що дозволяє підвищити точність, швидкість і гнучкість обробки даних.

Для досягнення поставленої мети в роботі визначено такі завдання:

- провести огляд існуючих підходів до моніторингу складу води та виявити їхні переваги й обмеження;
- проаналізувати можливості інтеграції сенсорних мереж, супутникових даних і лабораторних методів у єдину інформаційну систему;
- дослідити застосування алгоритмів машинного та глибокого навчання (зокрема LSTM, Autoencoder, дерев рішень, Gradient Boosting) для класифікації типів забруднень, виявлення аномалій та прогнозування динаміки параметрів води;
- визначити вимоги до архітектури IBC, включаючи сенсорний, комунікаційний, серверний та аналітичний рівні;
- сформулювати підходи до створення адаптивних і масштабованих систем моніторингу, здатних інтегруватися з міжнародними платформами та забезпечувати прозорість управлінських рішень у сфері екологічної безпеки.

Впроваджуючи гібридну модель штучного інтелекту, ми пропонуємо поєднати: мережі LSTM (довга короткострокова пам'ять), які використовуються для аналізу часових рядів параметрів води, прогнозування майбутніх змін, а також Autoencoder для виявлення нетипових відхилень від нормальних закономірностей, та дерева рішень або Gradient Boosting для інтерпретованої класифікації типу забруднення за набором параметрів. Також можлива інтеграція активного навчання, коли система самостійно «просить» спеціаліста перевірити незрозумілі випадки, тим самим, покращуючи якість навчання. Для покращення інформативності

даних можна реалізувати: фільтрацію шуму за допомогою алгоритмів згладжування, побудову трендів на основі часових рядів та прогнозування майбутнього стану води.

Таким чином, цілі статті спрямовані на теоретичне й практичне обґрунтування впровадження штучного інтелекту в екологічний моніторинг водних ресурсів [33], що дозволить своєчасно виявляти забруднення, підвищити ефективність управління водними ресурсами та створити основу для розвитку цифрових екологічних двійників водних об'єктів.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Структуровано та описано загальні вимоги до компонентів ІВС (Таблиця 15) та вимоги до датчиків (Таблиця 16) для проведення вимірювань [34].

Таблиця 15

Загальні вимоги до компонентів ІВС моніторингу водного середовища з ШІ

Тип вимог	Опис вимог
Надійність	стабільна робота в умовах змін температури, вологості, тиску
Сумісність	підтримка стандартних інтерфейсів (RS-485, USB, LoRa, Wi-Fi)
Точність	± 0.01 – 0.1 одиниць вимірювання
Чутливість	здатність виявляти мінімальні зміни параметрів
Повторюваність	стабільність результатів при повторних вимірюваннях
Енергоспоживання	акцент на низьке, особливо для автономних систем
Захист	IP65–IP68 для зовнішнього використання

Таблиця 16

Вимоги до датчиків ІВС моніторингу водного середовища з ШІ

Тип датчиків	Вимоги
pH-датчики	Автоматична калібровка, температурна компенсація, скляний/ISFET-елемент
ЕС (електропровідність)	Висока точність, стійкість до забруднень, калібрування в 2–3 точках
DO (розчинений кисень)	Оптичний або гальванічний тип, стабільність при зміні температури
Турбідиметричні	Низький поріг виявлення (<1 NTU), компенсація кольору води
Спектроскопічні	Висока роздільна здатність, підтримка VIS/NIR діапазону, машинне навчання
Іоноселективні	Вибірковість до конкретних іонів, стабільність мембрани
Ультразвукові	Безконтактність, точність ± 1 мм, стійкість до шуму

Архітектура запропонованої базової ІВС моніторингу водного середовища з ШІ [35] запропонована для пояснення етапів обробки інформації (рисунок 1) складається з сенсорного та комунікаційного рівня, центрального сервера та аналітичного рівня.

Сенсорний рівень – так званої сенсорної мережі у вигляді децентралізованих автономних вузлів з кількома датчиками (pH, розчиненого кисню, провідності, нітратів, температури, каламутності, мікропластику або інших) та передачі даних через LoRaWAN або NB-IoT для економії енергії. Комунікаційний рівень з проміжними шлюзами для агрегації даних, кешування та первинної фільтрації. Може включати шифрування та передачу до хмари або локального сервера [36]. Центральний сервер та обчислювального рівня, що використовується з хмарною платформою або периферійним сервером з попередньо розгорнутим модулем штучного інтелекту та реалізацією моделі глибокого навчання для: класифікації типів забруднення, виявлення тенденцій або аномалій (довгострокове прогнозування, сплески токсинів, витоки, аварійні скиди). Аналітичний рівень з модулем штучного інтелекту для обробки великих наборів даних (Big Data) та інтерфейсу користувача для аналітиків, менеджерів та громадських моніторингових організацій, де будуть зберігатися візуалізація даних, тривоги та рекомендації.

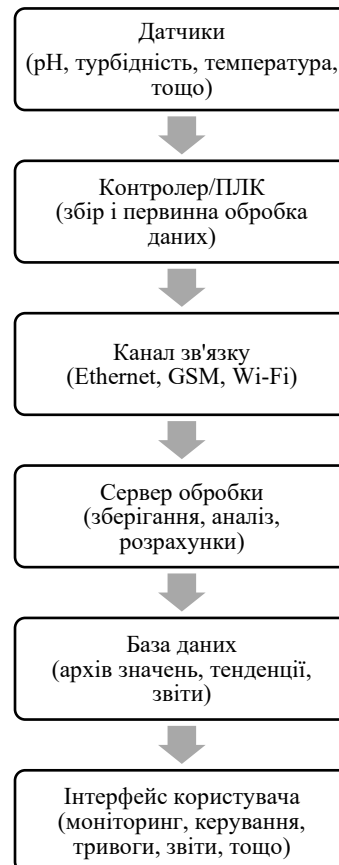


Рис. 1. Архітектура ІВС моніторингу водного середовища

Як ідею обробки даних, впроваджуючи гібридну модель штучного інтелекту [37], ми пропонуємо поєднати: мережі LSTM (довга короткострокова пам'ять), які використовуються для аналізу часових рядів параметрів води, прогнозування майбутніх змін, а також Autoencoder для виявлення нетипових відхилень від нормальних закономірностей, та дерева рішень або Gradient Boosting для інтерпретованої класифікації типу забруднення за набором параметрів. Також можлива інтеграція активного навчання, коли система самостійно «просить» спеціаліста перевірити незрозумілі випадки, тим самим покращуючи якість навчання. Для покращення інформативності даних можна реалізувати: фільтрацію шуму за допомогою алгоритмів згладжування, побудову трендів на основі часових рядів та прогнозування майбутнього стану води. Датчики безпосередньо вимірюють параметри води та передають дані на контролер або ПЛК (програмований логічний контролер). Контролер виконує попередню обробку, консолідує дані і по каналу зв'язку надсилає їх на сервер обробки. Сервер обробляє отриману інформацію, зберігає у базі даних, проводить розрахунки, аналітику й формує звіти. Кінцевий користувач взаємодіє із системою через інтерфейс моніторингу (наприклад, SCADA або web-додаток). Додатково для безпеки реалізуються контролю доступу, резервні копії даних та застосовуються заходи захисту мережі.

В результаті очікуємо, що безперервний моніторинг мінімізує затримки між виявленням проблеми та реагуванням. В залежності від потреб, це може бути погодинний, щоденний або щотижневий моніторинг. Ключовими є: самоадаптація, а саме підвищення точності в нових умовах, висока точність аналізу, навіть без повного набору даних, що стає можливою завдяки штучному інтелекту, та масштабованість системи, що забезпечує простий спосіб розширення за допомогою нових джерел. Одним із перспективних алгоритмів, який добре працює з часовими рядами, є нейронна мережа LSTM (Long Short-Term Memory). Така мережа дозволяє прогнозувати параметри води на основі історичних даних. Наприклад, на основі рівня рН, температури, електропровідності та MPC можна прогнозувати потенційне забруднення. Також доцільно використовувати кластерний аналіз (k-means або DBSCAN) для виявлення аномальних зон забруднення в режимі реального часу.

Для обговорення залишається одне з найбільших обмежень цієї роботи - це залежність від хмарної інфраструктури, яка може бути неможливою у віддалених або слаборозвинених регіонах для мобільних систем. Однак важливо зазначити, що якщо нам потрібно буде вдосконалити цей проєкт, це матиме більші витрати. Ці обмеження також слід враховувати під час інтерпретації результатів та масштабування системи до різних

середовищ. Подальші дослідження повинні дослідити розробку легких, енергоефективних моделей DL, придатних для периферійних обчислень. Також необхідні подальші дослідження для оптимізації розміщення датчиків та адаптивних методів вибірки даних у динамічних водних середовищах.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У 2020–2025 роках активно впроваджуються такі підходи до аналізу ГДК: динамічні пороги ГДК, залежно від сезону, біоіндикація, оцінка загального токсичного впливу, аналіз за допомогою штучного інтелекту, автоматичне порівняння вимірних даних з базами даних ГДК, візуальні попередження, прогнозування або моделювання трендів за допомогою машинного навчання. Інформаційно-вимірювальні системи моніторингу складу води дозволяють покращити якість моніторингу, швидко реагувати на зміни параметрів водного середовища, а також забезпечити прозорість та автоматизацію процесу контролю.

У ході дослідження було проаналізовано сучасні методи моніторингу та контролю водних середовищ, визначено їхні переваги й обмеження. Впровадження таких систем є важливою складовою сучасної екологічної політики та розвитку технологій для розумного управління природними ресурсами. Розробка автоматизованих систем моніторингу водного середовища базується на розподіленості, гнучкості, масштабованості та відкритості до інтеграції з державними та міжнародними екосистемами даних (наприклад, EIONET [38], Copernicus [39], DanubeWatch - ICPDR [40]).

У статті окреслено можливості інтеграції штучного інтелекту у функціонування інформаційно-вимірювальних систем. Описано, з посиланнями на існуючі патенти, як використання сенсорних мереж [41], хмарних технологій та алгоритмів глибокого навчання дозволяє підвищити точність і швидкість обробки даних [42], забезпечити безперервний контроль складу води, своєчасне виявлення аномалій і формування систем раннього попередження.

Встановлено, що ключовими перевагами впровадження інтелектуальних систем є:

- можливість поєднання даних з різних джерел (сенсорних вузлів, лабораторій, супутникових платформ);
- оперативне реагування на зміни стану водного середовища;
- прогнозування розвитку критичних ситуацій за допомогою моделей машинного навчання;
- підтримка прийняття управлінських рішень у сфері екологічної безпеки та сталого використання водних ресурсів.

Разом із тим, залишаються невирішеними проблеми технічної та економічної доступності таких систем, стандартизації даних, інтеграції з міжнародними платформами, а також потреба у фахівцях з міждисциплінарними компетенціями.

Перспективними напрямками подальших досліджень є:

- розробка моделей глибинного навчання, придатних для використання на периферійних обчислювальних пристроях;
- оптимізація алгоритмів обробки часових рядів для прогнозування динаміки параметрів води;
- вдосконалення методів вибору й розташування сенсорів у динамічних водних середовищах [43], [44];
- створення цифрових двійників водних об'єктів для моделювання сценаріїв забруднення;
- розширення міжнародної співпраці та інтеграція з європейськими екологічними платформами (EIONET, Copernicus, ICPDR).

Представлена детальна інформація про п'ять основних методів моніторингу водних середовищ:

Фізико-хімічні методи - забезпечують пряме вимірювання основних параметрів води з високою точністю.

Спектроскопічні методи - дозволяють ідентифікувати та кількісно визначати широкий спектр забруднювачів.

Акустичні методи - надають безконтактний спосіб оцінки властивостей води та концентрації домішок.

Біологічні методи - оцінюють екологічний стан водних екосистем через реакцію живих організмів.

Інтелектуальні методи - використовують AI для комплексного аналізу, прогнозування та оптимізації моніторингу.

Кожен метод має свої переваги та обмеження, тому оптимальним є їх вибіркове використання в рамках інтегрованої системи моніторингу водних середовищ.

Результати дослідження підтверджують перспективність впровадження штучного інтелекту у моніторинг водних ресурсів і визначають необхідність подальшої роботи над створенням адаптивних, масштабованих та інтегрованих систем, здатних забезпечити екологічну безпеку та сталий розвиток у глобальному вимірі.

Література

1. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України [Електронний ресурс]. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Міністерство_захисту_довкілля_та_природних_ресурсів_України
2. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України [Електронний ресурс]. URL: <https://mepr.gov.ua/>
3. Державна екологічна інспекція України [Електронний ресурс]. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Державна_екологічна_інспекція_України
4. Державна екологічна інспекція України [Електронний ресурс]. Пост 42. URL: <https://www.dei.gov.ua/post/42>
5. Ukraine Executive Summary. ENI-SEIS East [Електронний ресурс]. URL: <https://eni-seis.eionet.europa.eu/east/areas-of-work/access-to-environmental-information/products/ukraine-executive-summary-ua/@@@download/file>
6. Міністерство охорони здоров'я України. Наказ від 02.05.2022 № 721 «Про затвердження Гігієнічних нормативів якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення». Київ, 2022, с.13. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#n13>
7. Водний кодекс України. Нормативи екологічної безпеки водокористування // Відомості Верховної Ради України. 1995, № 24, с.389. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-вр#n389>
8. Directive 2013/39/EU. Amending Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council with regard to priority substances in the field of water policy. Official Journal of the European Union. 2013. L 226. P. 1-17. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/39/oj/eng>
9. Directive 2008/105/EC. Environmental quality standards in the field of water policy. Official Journal of the European Union. 2008. L 348. P. 84. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/105/oj/eng>
10. Zhang Y., Kong X., Deng L., Liu Y. "Monitor water quality through retrieving water quality parameters from hyperspectral images using graph convolution network with superposition of multi-point effect". A case study in Maozhou River Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 342, P. 118283. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118283>
11. Mishra A.K., Singh J., Mishra P.P. Microplastics in freshwater ecosystem: A serious threat for freshwater environment. Int. J. Environ. Sci. Technol. 20, 9189–9204 (2023). <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04489-x>
12. Mostofa M.G.K., Liu C., Mottaleb M.A., Wan G., Ogawa H., Vione D., Yoshioka T. Dissolved Organic Matter in Natural Waters. 2013. Photobiogeochemistry of Organic Matter. P. 1-137. URL: https://www.researchgate.net/publication/278651309_Dissolved_Organic_Matter_in_Natural_Waters
13. Obiri N.M., Van Laerhoven K. "A Survey of LoRaWAN-integrated Wearable Sensor Networks for Human Activity Recognition: Applications, Challenges and Possible Solutions", Wearable Sensors, Article, 2024, P. 1-24 https://www.researchgate.net/publication/385070164_A_Survey_of_LoRaWAN-integrated_Wearable_Sensor_Networks_for_Human_Activity_Recognition_Applications_Challenges_and_Possible_Solutions
14. Fang P., Wang Y., Zhao Y., Kang J. "Analysis of Prediction Confidence in Water Quality Forecasting Employing LSTM". 2025. Vol 17, Issue 7, P. 1050, DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/w17071050>
15. Siti Nadhirah Zainurin, Wan Zakiah Wan Ismail, Siti Nurul Iman Mahamud, Irneza Ismail, Juliza Jamaludin, Khairul Nabilah Zainul Ariffin and Wan Maryam Wan Ahmad Kamil. "Advancements in Monitoring Water Quality Based on Various Sensing Methods": A Systematic Review. Int. J. Environ. Res. Public Health 2022, 19(21), 14080; <https://doi.org/10.3390/ijerph192114080>
16. Kumari D., Paul D.K. "Assessing the Role of Bioindicators in Freshwater Ecosystem" Journal of Interdisciplinary Cycle Research. 2020. https://www.researchgate.net/publication/348098087_Assessing_the_Role_of_Bioindicators_in_Freshwater_Ecosystem
17. Верголяс М.Р., "Оцінка токсичності нітратів у воді з використанням цитоморфологічних показників тест-організмів" 2020, Ecological Sciences 3(30):129-132. DOI: <http://dx.doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.3-30.22>
18. Державне агентство водних ресурсів України. Моніторинг поверхневих вод. 2020 [Електронний ресурс]. URL: <https://davrr.gov.ua/monitoring-poverhnevih-vod1>
19. Державний моніторинг поверхневих вод [Електронний ресурс]. URL: <https://oouvr.gov.ua/dersh-monitoring-pov-vod/>
20. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною. Київ : МОЗ України, 2010, №452/17747, 25 с. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#n25>
21. ДСТУ 7525:2014 Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 16 с. https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/1-10672-dstu_voda_pytna.pdf
22. Визначення якості води методами біоіндикації : науково-методичний посібник. Київ: НЕЦУ, 2011. с. 9-15 URL: <https://necu.org.ua/bioindykatsiya-book/>

23. Оцінка токсичності нітратів у воді з використанням цитоморфологічних показників тест-організмів. Екологічні науки № 3 (30), 2020, с. 129-132. URL: <http://www.ecoj.dea.kiev.ua/archives/2020/3/24.pdf>
24. Дмитрієва О., Колдоба І., Михайлова С., Тупотілов О., Коляда О., Семенченко О., Еколого-соціальні (медичні) дослідження евтрофованих джерел господарсько-питного водопостачання. Київ: КНУБА, 2014. с. 93-101 URL: <https://repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/a840a28e-b804-412c-9b63-f5133faf6870/content>
25. Основні відомості про якість води та її тестування. Технічний довідник Water Mission, 2021. URL: https://watermission.org/wp-content/uploads/2022/04/Understanding-and-Testing-Water-Quality_Ukrainian.pdf
26. Основні показники якості води. Aqua Life “Статті про воду”. 2020, URL: <https://aqua-life.ua/ua/info/osnovnye-pokazateli-kachestva-vody/>
27. Скакун О., Екологічний контроль та екологічний моніторинг водних ресурсів у мегаполісах та промислових центрах. Технічні науки та технології. Таврійський Національний Університет імені В.І. Вернадського. 2024, № 6., Ч.1., с. 81-85. URL: DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/14>
28. Здоровенко, В., & Шолудько, К. (2025). Аналіз сучасних методів контролю забруднення поверхні води. 82(2), 309–314. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-82-44>
29. Олексій А., Верлань А., «Покращений метод аналізу акустичних сигналів водного середовища на основі згорткової нейромережі SOP», Вісник ВПІ, вип. №6, с. 129–134, 2024, DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-177-6-129-134>
30. Андреев В., Інформаційно-вимірювальна система збору даних у важкодоступних областях. Магістерська дисертація, Київ: КПІ, 2024. 53 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/a7032ce7-9f0c-417f-9a4f-29c67d70563f/content>
31. Погребенник В., Політило Р., Романюк А., “Аналіз методичної похибки вимірювання загальної концентрації домішок у воді”. Вісник НТУУ “КПІ” Київ: КПІ, 2010. 76-80 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/f40bb2c6-6ead-44f5-90f0-141f70ca5781/content>
32. Защепкіна Н. М., Шульга О. В., Наконечний О. А. Метрологічне забезпечення інформаційно-вимірювальних систем : навчальний посібник. Київ: КПІ, 2021. 46 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/13a3be2a-d5e3-47a8-b894-0b1b95c6c854/content>
33. Корпильов Д., Здобицький А., Мокрицька О., Чернух В. “Розробка інтелектуальної системи моніторингу водних ресурсів”. Computer design systems. 2025. Vol 7, № 1. с.81-93 URL: <https://doi.org/10.23939/cds2025.01.081>
34. Системи контролю параметрів води. SimVolt [Електронний ресурс]. URL: <https://simvolt.ua/sistemi-kontroly-parametriv-vodi/>
35. Штучний інтелект і машинне навчання революціонізують процес знезараження стічних вод. Блог Qualia Bio [Електронний ресурс]. URL: <https://qualia-bio.com/uk/blog/ai-and-machine-learning-revolutionize-effluent-decontamination/>
36. Методики аналізу води [Електронний ресурс]. URL: <https://akvo.com.ua/ua/articles/metodiki-analiza-vody>
37. Матвійчук М. “Оптимізація стоків з використанням нейронної мережі при очищенні промислових стічних вод”. Журнал штучного інтелекту. 2023. № 2. С. 107-120. URL: <https://doi.org/10.15407/jai2023.02.107>
38. European Environment Information and Observation Network [Електронний ресурс]. URL: <https://www.eionet.europa.eu>
39. Copernicus Programme [Електронний ресурс]. URL: <https://www.copernicus.eu/en>
40. International Commission for the Protection of the Danube River [Електронний ресурс]. URL: <https://www.icpdr.org/>
41. “Water quality monitoring device” Application filed by Tianjin Huayun, Tianyi Special Meteorological Detection Technology Co ltd : Пат. №CN215066615U Китай, 2021, URL: [https://patents.google.com/patent/CN215066615U/en?q=\(water+pollution+detection+sensor+monitoring\)&oq=water+pollution+detection+sensor+monitoring&page=1](https://patents.google.com/patent/CN215066615U/en?q=(water+pollution+detection+sensor+monitoring)&oq=water+pollution+detection+sensor+monitoring&page=1)
42. Pool and spa water quality control system and method, Application filed by WaterGuru Inc : Пат. №US11162272B2 США, 2020 URL: [https://patents.google.com/patent/US11162272B2/en?q=\(water+quality+monitoring+system\)&oq=water+quality+monitoring+system&page=1](https://patents.google.com/patent/US11162272B2/en?q=(water+quality+monitoring+system)&oq=water+quality+monitoring+system&page=1)
43. Біла Т., Козичар М., Ляшенко Є. “Визначення забруднення поверхневих вод методом окиснення” Водні ресурси та аквакультура. 2021. № 2. С. 197-207. DOI <https://doi.org/10.32851/wba.2021.2.17>
44. Гринь Г. І., Мохонько В. І., Суворіта О. В. Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища : підручник. Сєверодонецьк: СХУ ім. В. Даля, 2019. 420 с. URL: https://deps.snu.edu.ua/media/filer_public/f9/3e/f93e762d-4e8d-4334-8d0b-282c89e239a3/metodi_vimiriuvannia_par_ns_8_04_pidruchnik_.pdf

References

1. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine [Electronic resource]. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Міністерство_захисту_довкілля_та_природних_ресурсів_України
2. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine [Electronic resource]. URL: <https://mepr.gov.ua/>
3. State Environmental Inspectorate of Ukraine [Electronic resource]. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Державна_екологічна_інспекція_України
4. State Environmental Inspectorate of Ukraine [Electronic resource]. Post 42. URL: <https://www.dei.gov.ua/post/42>
5. Ukraine Executive Summary. ENI-SEIS East [Electronic resource]. URL: <https://eni-seis.eionet.europa.eu/east/areas-of-work/access-to-environmental-information/products/ukraine-executive-summary-ua/@/download/file>
6. Ministry of Health of Ukraine. Order No. 721 of May 2, 2022 “On approval of hygienic standards for the quality of water bodies for drinking, domestic and other needs of the population”. Kyiv, 2022, p.13. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#n13>
7. Water Code of Ukraine. Environmental safety standards of water use // Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine. 1995, No. 24, p. 389. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-bp#n389>
8. Directive 2013/39/EU. Amending Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council with regard to priority substances in the field of water policy. Official Journal of the European Union. 2013. L 226. P. 1–17. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/39/oj/eng>
9. Directive 2008/105/EC. Environmental quality standards in the field of water policy. Official Journal of the European Union. 2008. L 348. P. 84. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/105/oj/eng>
10. Zhang Y., Kong X., Deng L., Liu Y. Monitor water quality through retrieving water quality parameters from hyperspectral images using graph convolution network with superposition of multi-point effect. A case study in Maozhou River. *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 342, p. 118283. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118283>
11. Mishra A.K., Singh J., Mishra P.P. Microplastics in freshwater ecosystem: A serious threat for freshwater environment. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2023. Vol. 20, pp. 9189–9204. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04489-x>
12. Mostofa M.G.K., Liu C., Mottaleb M.A., Wan G., Ogawa H., Vione D., Yoshioka T. Dissolved Organic Matter in Natural Waters. In: *Photobiogeochemistry of Organic Matter*. 2013. P. 1–137. URL: https://www.researchgate.net/publication/278651309_Dissolved_Organic_Matter_in_Natural_Waters
13. Obiri N.M., Van Laerhoven K. A Survey of LoRaWAN-integrated Wearable Sensor Networks for Human Activity Recognition: Applications, Challenges and Possible Solutions. *Wearable Sensors*. 2024. P. 1–24. https://www.researchgate.net/publication/385070164_A_Survey_of_LoRaWAN-integrated_Wearable_Sensor_Networks_for_Human_Activity_Recognition_Applications_Challenges_and_Possible_Solutions
14. Fang P., Wang Y., Zhao Y., Kang J. Analysis of Prediction Confidence in Water Quality Forecasting Employing LSTM. *Water*. 2025. Vol. 17, Issue 7, p. 1050. <https://doi.org/10.3390/w17071050>
15. Zainurin S.N., Wan Ismail W.Z., Mahamud S.N.I., Ismail I., Jamaludin J., Zainul Ariffin K.N., Wan Ahmad Kamil W.M. Advancements in Monitoring Water Quality Based on Various Sensing Methods: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. 19(21), 14080. <https://doi.org/10.3390/ijerph192114080>
16. Kumari D., Paul D.K. Assessing the Role of Bioindicators in Freshwater Ecosystem. *Journal of Interdisciplinary Cycle Research*. 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/348098087_Assessing_the_Role_of_Bioindicators_in_Freshwater_Ecosystem
17. Vergolyas M.R. Assessment of nitrate toxicity in water using cytomorphological indicators of test organisms. *Ecological Sciences*. 2020. 3(30):129–132. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.3-30.22>
18. State Agency of Water Resources of Ukraine. Monitoring of surface waters. 2020 [Electronic resource]. URL: <https://davr.gov.ua/monitoring-poverhnevih-vod1>
19. State monitoring of surface waters [Electronic resource]. URL: <https://oouvr.gov.ua/dersh-monitoring-pov-vod/>
20. DSanPiN 2.2.4-171-10. Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption. Kyiv: Ministry of Health of Ukraine, 2010, No. 452/17747, 25 p. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#n25>
21. DSTU 7525:2014. Drinking water. Requirements and quality control methods. Kyiv: Ministry of Economic Development of Ukraine, 2014. 16 p. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/1-10672-dstu_voda_pytna.pdf
22. Determining water quality by bioindication methods: Scientific and methodological manual. Kyiv: NECU, 2011. pp. 9–15. URL: <https://necu.org.ua/bioindykatsiya-book/>
23. Assessment of nitrate toxicity in water using cytomorphological indicators of test organisms. *Ecological Sciences*. No. 3(30), 2020, pp. 129–132. URL: <http://www.ecoj.dea.kiev.ua/archives/2020/3/24.pdf>
24. Dmytriieva O., Koldoba I., Mykhailova S., Tupotilov O., Kolyada O., Semenchenko O. Ecological and social (medical) studies of eutrophic drinking water sources. Kyiv: KNUCA, 2014. pp. 93–101. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/a840a28e-b804-412c-9b63-f5133faf6870/content>
25. Key information on water quality and its testing. Water Mission Technical Guide. 2021. URL: https://watermission.org/wp-content/uploads/2022/04/Understanding-and-Testing-Water-Quality_Ukrainian.pdf
26. Main indicators of water quality. Aqua Life “Articles about water”. 2020. URL: <https://aqua-life.ua/ua/info/osnovnye-pokazateli-kachestva-vody/>
27. Skakun O. Environmental control and monitoring of water resources in megacities and industrial centers. *Technical Sciences and Technologies*. Tavria National V.I. Vernadsky University. 2024. No. 6(1), pp. 81–85. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/14>
28. Zdorenko V., Sholudko K. Analysis of modern methods of surface water pollution control. 2025. 82(2), pp. 309–314. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-82-44>
29. Oleksii A., Verlan A. Improved method of analysis of acoustic signals of the aquatic environment based on SOP convolutional neural network. *Visnyk VPI*. 2024. No. 6, pp. 129–134. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-177-6-129-134>
30. Andrieiev V. Information-measuring system for data collection in hard-to-reach areas. Master's thesis, Kyiv: KPI, 2024. 53 p. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/a7032ce7-9f0c-417f-9a4f-29c67d70563f/content>
31. Pohrebennyk V., Politilo R., Romanyuk A. Analysis of methodological error in measuring total concentration of impurities in water. *Bulletin of NTUU “KPI”*. Kyiv: KPI, 2010. pp. 76–80. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/f40bb2c6-6ead-44f5-90f0-141f70ca5781/content>
32. Zashchepkina N.M., Shulha O.V., Nakonechnyi O.A. Metrological support of information-measuring systems: Textbook. Kyiv: KPI, 2021. 46 p. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/13a3be2a-d5e3-47a8-b894-0b1b95c6c854/content>
33. Korypylov D., Zdobytskyi A., Mokrytska O., Cherniukh V. Development of an intelligent water resources monitoring system. *Computer Design Systems*. 2025. Vol. 7, No. 1, pp. 81–93. <https://doi.org/10.23939/cds2025.01.081>
34. Water parameter control systems. SimVolt [Electronic resource]. URL: <https://simvolt.ua/sistemi-kontroly-parametriv-vodi/>

35. Artificial intelligence and machine learning revolutionize the process of wastewater disinfection. Qualia Bio Blog [Electronic resource]. URL: <https://qualia-bio.com/uk/blog/ai-and-machine-learning-revolutionize-effluent-decontamination/>
36. Water analysis methods [Electronic resource]. URL: <https://akvo.com.ua/ua/articles/metodiki-analiza-vody>
37. Matviichuk M. Optimization of wastewater using neural network in treatment of industrial effluents. *Journal of Artificial Intelligence*. 2023. No. 2, pp. 107–120. <https://doi.org/10.15407/jai2023.02.107>
38. European Environment Information and Observation Network [Electronic resource]. URL: <https://www.eionet.europa.eu>
39. Copernicus Programme [Electronic resource]. URL: <https://www.copernicus.eu/en>
40. International Commission for the Protection of the Danube River [Electronic resource]. URL: <https://www.icpdr.org/>
41. Water quality monitoring device. Application filed by Tianjin Huayun, Tianyi Special Meteorological Detection Technology Co. Ltd: Patent CN215066615U. China, 2021. URL: <https://patents.google.com/patent/CN215066615U/en>
42. Pool and spa water quality control system and method. Application filed by WaterGuru Inc: Patent US11162272B2. USA, 2020. URL: <https://patents.google.com/patent/US11162272B2/en>
43. Bila T., Kozychar M., Liashenko Ye. Determination of surface water pollution by oxidation method. *Water Resources and Aquaculture*. 2021. No. 2, pp. 197–207. <https://doi.org/10.32851/wba.2021.2.17>
44. Hryn H.I., Mokhonko V.I., Suvorita O.V. Methods of measuring environmental parameters: Textbook. Sievierodonetsk: Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2019. 420 p. URL: https://deps.snu.edu.ua/media/filer_public/f9/3e/f93e762d-4e8d-4334-8d0b-282c89e239a3/metodi_vimiriuvannia_par_ns_8_04_pidruchnik_.pdf