
ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ

УДК 351:630 (477)

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.4-49.4>

ЦИФРОВИЙ МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ ВОДИ, ВИКЛИКИ ТА РІШЕННЯ

Корніюк А.В., Пацева І.Г.

Державний університет «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир
rig@ztu.edu.ua

Цифровий моніторинг якості води є важливою складовою сучасних зусиль у збереженні та покращенні якості водних ресурсів. Він дозволяє отримувати об'єктивні дані про стан водойм, що сприяє прийняттю обґрунтованих рішень з покращення якості води і збереження екосистем. Ось деякі виклики та рішення, пов'язані з цифровим моніторингом якості води:

1. Велика кількість даних: Моніторинг водних ресурсів генерує величезний обсяг даних. Одним із викликів є ефективна збір, збереження та обробка таких великих об'ємів інформації. Рішенням може бути використання хмарних систем збереження даних, автоматизація процесів обробки даних та використання штучного інтелекту для аналізу.

2. Точність та надійність даних: Необхідно переконатись, що дані, зібрані під час моніторингу, є точними та надійними. Для цього можуть використовуватись сучасні сенсори та метеостанції з автоматичними калібруваннями, а також регулярна перевірка і технічне обслуговування обладнання.

3. Розподілені географічні об'єкти: Водні ресурси можуть бути розподілені географічно, що ускладнює збір даних. Цифровий моніторинг може розв'язати цю проблему, використовуючи сучасні мережі зв'язку та технології збір даних в реальному часі.

4. Моніторинг різних параметрів: Важливо моніторити різні параметри якості води, такі як рівень забруднення, рівень кисню, рН, температура тощо. Рішенням може бути використання комплексних моніторингових систем, які вимірюють різні параметри одночасно.

5. Інтеграція даних: Інформація про якість води може надходити з різних джерел, таких як лабораторії, датчики на днах річок, датчики на дронах тощо. Викликом є інтеграція всієї цієї інформації для забезпечення єдиної картини стану водних ресурсів. Цифрові технології дозволяють збирати і обробляти дані з різних джерел та інтегрувати їх для отримання повної карти.

6. Забезпечення доступності інформації: Результати моніторингу повинні бути доступні різним зацікавленим сторонам, таким як органи влади, дослідники, громадські організації тощо. Рішенням може бути створення цифрових платформ, де дані можуть бути опубліковані та доступні відкрито для громадськості.

7. Реагування на кризові ситуації: Цифровий моніторинг може допомагати виявляти надзвичайні ситуації, такі як витіки нафти або інші забруднення, що дозволить приймати швидкі та ефективні заходи для нейтралізації загрози.

Цифровий моніторинг якості води є потужним інструментом у вирішенні проблем забруднення та збереженні водних ресурсів. Він дозволяє більш оперативно та об'єктивно реагувати на екологічні виклики та покращити стан довкілля. *Ключові слова:* цифровий моніторинг поверхневих вод, моніторинг, якість води.

Challenges and solutions of the digital water quality monitoring. Korniiuk A., Patseva I.

Digital water quality monitoring is an important component of modern efforts to preserve and improve the quality of water resources. It provides objective data on the state of water bodies, which helps to make informed decisions to improve water quality and preserve ecosystems. Here are some challenges and solutions related to digital water quality monitoring:

1. Large amount of data: Water monitoring generates a huge amount of data. One of the challenges is the efficient collection, storage and processing of such large amounts of information. The solution can be the use of cloud-based data storage systems, automation of data processing, and the use of artificial intelligence for analysis.

2. Data accuracy and reliability: It is necessary to ensure that the data collected during monitoring is accurate and reliable. This can be achieved by using modern sensors and weather stations with automatic calibrations, as well as regular inspection and maintenance of equipment.

3. Distributed geographical objects: Water resources can be distributed geographically, making data collection difficult. Digital monitoring can solve this problem by utilizing modern communication networks and real-time data collection technologies.

4. Monitoring of various parameters: It is important to monitor various water quality parameters such as pollution levels, oxygen levels, pH, temperature, etc. The solution may be to use integrated monitoring systems that measure different parameters simultaneously.

5. Data integration: Water quality information can come from a variety of sources, such as laboratories, sensors on the river bottom, sensors on drones, etc. The challenge is to integrate all this information to provide a single picture of the state of water resources. Digital technologies allow collecting and processing data from different sources and integrating them to obtain a complete map.

6. Ensure accessibility of information: Monitoring results should be made available to various stakeholders such as authorities, researchers, NGOs, etc. A solution may be to create digital platforms where data can be published and made available openly to the public.

7. Responding to crisis situations: Digital monitoring can help to detect emergencies such as oil leaks or other pollution, allowing for quick and effective measures to be taken to neutralize the threat.

Digital water quality monitoring is a powerful tool in solving pollution problems and preserving water resources. It allows us to respond more quickly and objectively to environmental challenges and improve the state of the environment. *Key words:* digital monitoring of surface water, monitoring, water quality.

Основною метою цієї статті є дослідження та оцінка можливостей цифрового моніторингу якості води. Вона спрямована на розгляд сучасних цифрових технологій та їхню роль у вимірюванні та аналізі параметрів води. Водночас, стаття також має на меті виявити можливі виклики та обмеження, пов'язані з впровадженням цифрових технологій в моніторинг води, а також вказати на необхідність подальшого дослідження та розробки стандартів та регулюючих політик щодо використання цифрового моніторингу якості води.

Методи моніторингу якості води. Моніторинг якості води є критично важливим завданням для забезпечення безпеки водних ресурсів та охорони здоров'я людей і екосистем. Сучасний прогрес у цифрових технологіях привів до розвитку нових методів моніторингу, які надають більш точні, ефективні та в реальному часі дані про якість води. Розглянемо деякі з цих сучасних методів моніторингу якості води та їхню роль у поліпшенні процесу моніторингу.

Традиційні методи моніторингу:

- **Збір проб та лабораторні аналізи:** Традиційний метод забору проб води та їх подальший аналіз у лабораторії є одним із найбільш поширених способів визначення якості води. Цей метод заснований на зборі зразків води з різних джерел та аналізі їх на наявність різних хімічних та біологічних параметрів. Лабораторні аналізи можуть включати визначення рівня розчинених речовин, пестицидів, токсичних металів, бактерій та інших показників якості води [1].

- **Польові тест-системи:** Польові тест-системи, такі як тест-смужки або портативні аналізатори, є іншими традиційними методами моніторингу якості води. Вони дозволяють швидко визначати деякі хімічні показники, такі як рівень рН, розчинений кисень, електроліти, токсичні речовини тощо [2]. Ці тест-системи зазвичай прості у використанні та забезпечують швидкі результати, що дозволяє оперативно виявляти проблеми з якістю води.

Автоматизовані системи моніторингу:

- **Системи з датчиками в реальному часі:** Застосування сучасних датчиків із здатністю працювати в реальному часі дозволяє забезпечити неперервний моніторинг якості води. Ці датчики можуть вимірювати різні параметри, такі як рН, температура, концентрація розчинених речовин, рівень кисню, електроліти тощо. Вони зазвичай підключаються до автоматизованих систем збору даних, які забезпечують збір, аналіз та візуалізацію інформації у реальному часі.

- **Системи моніторингу з використанням сучасних технологій:** Застосування сучасних технологій, таких як Інтернет речей (IoT), хмарні обчислення та штучний

інтелект, дозволяє створити інноваційні системи моніторингу якості води [3]. Ці системи можуть включати бездротові сенсори, автоматизовані системи збору та обробки даних, системи прогнозування забруднення та автоматичне сповіщення про небезпеки. Вони забезпечують широкі можливості для збору даних у режимі реального часу та надають більш точну та оперативну інформацію про стан якості води.

Використання географічних інформаційних систем (ГІС):

- **ГІС для моніторингу водних ресурсів:** ГІС є потужним інструментом для збору, зберігання, аналізу та візуалізації географічних даних. Використання ГІС у моніторингу якості води дозволяє інтегрувати дані з різних джерел, включаючи дані про забруднення, гідрологічні параметри та географічні характеристики. Це допомагає зрозуміти просторовий розподіл забруднення та його вплив на різні водні джерела [4]. На рис. 1 ми можемо побачити супутникове зображення м.Житомир, жовтим кольором виділено річки та водойми.



Рис. 1. Зображення м. Житомира із використанням ГІС

• ГІС для прогнозування забруднення водних ресурсів: Використання ГІС у поєднанні з моделями прогнозування дозволяє здійснювати прогнозування забруднення водних ресурсів. Це дозволяє визначати потенційні джерела забруднення, передбачати розподіл забруднення у водних системах та розробляти ефективні стратегії управління якістю води.

До недоліків використання традиційних підходів можна віднести наступні обмеження. *Затримка в отриманні результатів*: недолік полягає у затримці між збором проби води та отриманням результатів аналізу. Зазвичай, проби збираються на місці збору та транспортуються до лабораторії для подальшого аналізу, що може займати кілька годин або навіть днів. Це може створювати затримки в сприйнятті негативних змін у якості води та унеможливити негайну реакцію на потенційні загрози [5]. *Обмежене просторове покриття*: традиційні методи моніторингу вимагають фізичного збору проб води з різних джерел. Це обмежує просторове покриття моніторингу, особливо в великих або віддалених водних системах. Віддалені або важкодоступні місця можуть залишатися без моніторингу, що ускладнює здатність вчасно виявляти забруднення або зміни в якості води в цих областях. *Високі витрати та трудомісткість*: Традиційні методи моніторингу води, особливо лабораторні аналізи, можуть бути витратними та вимагати значних фінансових та людських ресурсів. Збір проб, їх транспортування, обробка та аналіз у лабораторії вимагають фінансових вкладень на прилади, хімічні реагенти, працівників та інфраструктуру. Крім того, ці процеси можуть бути часо- та трудомісткими, особливо при потребі в регулярному моніторингу. *Відсутність неперервного моніторингу*: традиційні методи моніторингу зазвичай засновані на інтервальному зборі проб та аналізі [6]. Це означає, що моніторинг проводиться в певні моменти часу, а не неперервно. Зміни у якості води, які можуть статися між моментами моніторингу, можуть залишатися незрозумілими. Для отримання повної картини стану якості води потрібен постійний, неперервний моніторинг.

Переваги цифрового моніторингу. Цифровий моніторинг якості води надає значні переваги порівняно з традиційними методами моніторингу. Використання сучасних цифрових технологій дозволяє збільшити точність, ефективність та швидкість моніторингу, а також покращити здатність до виявлення забруднень та змін в якості води. Розглянемо деякі переваги використання цифрових технологій у моніторингу якості води.

• *Неперервний моніторинг*: Цифрові технології дозволяють здійснювати неперервний моніторинг якості води. Завдяки датчикам, автоматичним засобам збору даних та Інтернету речей (IoT), можна отримувати постійну потокову інформацію про параметри якості води, такі як рівень рН, температура, розчинені речовини та інші. Це дозволяє вияв-

ляти негативні зміни в реальному часі і реагувати на них негайно.

• *Великий обсяг даних*: Цифрові технології дозволяють збирати та аналізувати великі обсяги даних щодо якості води. Застосування автоматизованих систем та сенсорів забезпечує збір даних в режимі реального часу з багатьох джерел. Це дає можливість отримувати більш повну і точну інформацію про якість води, розподіл забруднень та тенденції змін [6]. На рис. 2 ми можемо побачити концепцію BigData яка використовується в різноманітних напрямках для отримання та обробки даних.



Рис. 2. Концепція Big Data

• *Геопросторовий аналіз*: Цифрові технології, такі як географічні інформаційні системи (ГІС) та дистанційне зондування, дозволяють здійснювати геопросторовий аналіз якості води. Це дозволяє виявляти зв'язки між параметрами якості води та географічними факторами, такими як використання землі, гідрологічні особливості та інші [4]. ГІС може бути використано для візуалізації та аналізу даних якості води на карті, що допомагає приймати обґрунтовані рішення з охорони водних ресурсів.

• *Передача даних у реальному часі*: Цифрові технології дозволяють передавати дані про якість води у реальному часі. Це дозволяє швидко реагувати на виникнення проблем та вживати відповідних заходів для їх вирішення [3]. Наприклад, системи моніторингу можуть автоматично сповіщати про виявлення надмірного забруднення води або порушення якості, що дозволяє оперативно реагувати на ситуацію та запобігти подальшому поширенню забруднення.

• *Інтеграція даних та аналітика*: Цифрові технології дозволяють інтегрувати дані з різних джерел та проводити аналітику якості води. Застосування алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту дозволяє виявляти шаблони, тенденції та аномалії в даних, що сприяє більш ефективному виявленню та прогнозуванню проблем якості води [6].

Цифровий моніторинг якості води ґрунтується на принципах збору, передачі, аналізу та інтерпретації даних з використанням цифрових технологій. Основна мета цього підходу полягає в забезпеченні оперативного та ефективного контролю якості води, а також вчасного виявлення забруднень та реагування на них. Також цифровий моніторинг якості води забезпечує високу точність, швидкість та доступність збору та аналізу даних, що сприяє поліпшенню ефективності та якості моніторингу водних ресурсів.

Існуючі рішення. Звісно на сьогоднішній день вже існує багато різноманітних рішень та засобів цифрового моніторингу, розглянемо деякі з них.

1. Платформа WaterBot: WaterBot – це приклад цифрової платформи, розробленої для моніторингу якості води. Вона включає в себе набір датчиків, які вимірюють різні параметри, такі як рН-рівень, температура, розчинений кисень, електрична провідність та інші. Дані з цих датчиків передаються до централізованої системи, де вони аналізуються та візуалізуються для операторів системи моніторингу. WaterBot надає зручний спосіб контролювати якість води та реагувати на зміни у реальному часі [8]. На рис. 3 зображено вимірювальний модуль та програмне забезпечення платформи WaterBot, зображення взято з офіційного ресурсу платформи.

2. Сенсори для вимірювання концентрації речовин: Деякі цифрові сенсори спеціально призначені для вимірювання концентрації різних речовин у воді. Наприклад, сенсори на основі фотометрії можуть вимірювати концентрацію амонію, нітратів, фосфатів та інших хімічних сполук у воді. Ці сенсори зазвичай підключаються до цифрових платформ або систем моніторингу, де дані аналізуються та використовуються для оцінки якості води [9].

3. Датчики розташування та геопросторового моніторингу: Деякі цифрові платформи використовують GPS-датчики для вимірювання місцезнаходження та геопросторового розташування джерел

води. Це дозволяє точно визначати місце збору проб та встановлення датчиків, що сприяє точному визначенню походження забруднень та аналізу зони впливу на якість води [10].

4. Датчики розташування та геопросторового моніторингу: Деякі цифрові платформи використовують GPS-датчики для вимірювання місцезнаходження та геопросторового розташування джерел води. Це дозволяє точно визначати місце збору проб та встановлення датчиків, що сприяє точному визначенню походження забруднень та аналізу зони впливу на якість води [11].

Результати досліджень показують, що використання цифрових технологій у моніторингу якості води значно поліпшує передачу даних та збір інформації, що сприяє більш точному та оперативному виявленню забруднень та моніторингу параметрів водного середовища.

Дослідження проведені у межах проекту «Digital Water Monitoring» [12] показали, що застосування сенсорних мереж та Інтернету речей (IoT) значно полегшує збір даних про якість води. Дані, зібрані з різних сенсорів, передаються через бездротову мережу до централізованої системи моніторингу, що дозволяє операторам швидко отримувати доступ до актуальної інформації про стан води. Дослідники встановили, що цифровий моніторинг зменшує час від збору даних до їх аналізу та реагування на відхилення у якості води.

Додатково, дослідження в галузі цифрового моніторингу вказують на важливість розробки інтелектуальних аналітичних систем. Застосування машинного навчання та штучного інтелекту дозволяє виявляти складні зв'язки між різними параметрами води та передбачати можливі ризики забруднення. Наприклад, дослідження, проведені на основі інтелектуальної системи моніторингу, показали високу ефективність у прогнозуванні змін якості води та виявленні потенційних джерел забруднення.

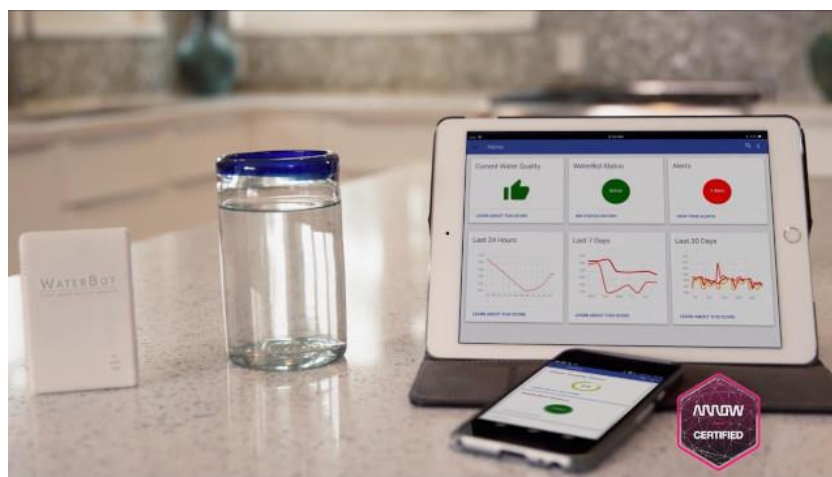


Рис. 3. Зовнішній вигляд датчика та ПЗ WaterBot

Оцінка точності вимірювань. Оцінка точності та надійності даних, отриманих з датчиків, є важливим аспектом цифрового моніторингу якості води. Надійність та точність даних впливають на достовірність результатів аналізу та прийняття рішень щодо управління водними ресурсами. Для забезпечення якості даних, отриманих з датчиків, необхідно враховувати декілька факторів.

Калібрування датчиків є процесом налаштування їх параметрів та перевірки відповідності вимірюваних значень стандартним величинам. Це дозволяє коректно визначати значення параметрів якості води. Регулярне калібрування датчиків допомагає зберігати їх точність та надійність протягом тривалого періоду [13]. Регулярний моніторинг якості датчиків є важливим кроком для забезпечення точності та надійності отриманих даних. Це включає перевірку правильності роботи датчиків, перевірку їх стабільності та виявлення можливих пошкоджень або відхилень у вимірюваннях. Моніторинг якості датчиків допомагає вчасно виявляти проблеми та забезпечувати надійність даних.

Для забезпечення точності та надійності даних, отриманих з датчиків, необхідно виконувати ретельний контроль якості. Це включає перевірку інтервалів вимірювання, виявлення та коригування помилок вимірювань, фільтрацію шумів та виявлення викидів даних. Застосування розумних алгоритмів та методів обробки даних допомагає забезпечити точність та надійність отриманих результатів. Для оцінки точності даних, отриманих з датчиків, важливо порівняти їх результати з результатами, отриманими за допомогою референтних методів вимірювання якості води. Це дозволяє встановити відповідність та відхилення між двома наборами даних, що сприяє підвищенню довіреності відомостей, отриманих з датчиків [14].

Оцінка точності та надійності даних з датчиків є важливим етапом в процесі цифрового моніторингу якості води. Використання вищезгаданих підходів допомагає забезпечити якість та достовірність отриманих результатів, що в свою чергу сприяє ефективному управлінню водними ресурсами та збереженню довкілля.

Порівняння результатів цифрового моніторингу з традиційними методами є важливим аспектом в оцінці ефективності та переваг цифрового підходу до моніторингу якості води. Дослідження показують, що цифровий моніторинг може мати деякі переваги порівняно з традиційними методами.

Одна з переваг цифрового моніторингу полягає в його здатності забезпечувати швидку передачу даних та отримання результатів. Традиційні методи вимагають більш тривалого процесу збору проб, транспортування до лабораторії та аналізу. У порівнянні з цим, цифрові технології дозволяють отримати результати в режимі реального часу, що забезпечує швидку реакцію на зміни в якості води.

Також традиційні методи моніторингу вимагають значних витрат на лабораторне обладнання, хімічні реагенти та професіоналів для збору та аналізу проб. У той же час, цифрові технології, зокрема сенсори та IoT, можуть бути відносно доступними з точки зору вартості і забезпечувати постійне моніторингове покриття. Це може знизити витрати на моніторинг та забезпечити широкий охоплення даних.

Цифровий моніторинг може забезпечувати широку географічне покриття завдяки розподіленню датчиків у різних точках водних систем. Це дозволяє отримувати дані з великої кількості місць одночасно, що розширює масштаб інформації про якість води. У порівнянні з цим, традиційні методи вимагають фізичного збору проб з обмежених місць та обмеженого покриття. Цифрові технології, такі як сенсорні мережі та штучний інтелект, можуть відкривати нові можливості для аналізу даних та виявлення залежностей. Застосування алгоритмів машинного навчання та статистичних моделей дозволяє виявляти тенденції, прогнозувати зміни та ідентифікувати потенційні проблеми в якості води. Традиційні методи моніторингу часто не мають таких розширених можливостей аналізу.

Цифровий моніторинг може бути пов'язаний з системами сповіщення та реагування, що дозволяє оперативно реагувати на зміни якості води. Завдяки автоматичній передачі даних та аналізу в реальному часі, цифрові платформи можуть виявляти небезпечні ситуації та сповіщати відповідних водокористувачів або операторів систем водопостачання для подальшої реакції. У традиційних методах такий процес може зайняти більше часу та залежати від людського фактору.

Порівняння результатів цифрового моніторингу з традиційними методами вказує на потенційні переваги цифрових технологій у вимірюванні та моніторингу якості води. Однак, важливо враховувати контекст і особливості конкретних досліджень та датчиків, а також використовувати додаткові перевірки та аналізи для підтвердження результатів.

Використання цифрового моніторингу якості води має потенціал для різних застосувань, включаючи виявлення забруднень, оцінку екологічного стану та забезпечення безпеки води. Цифровий моніторинг дозволяє постійно відстежувати параметри якості води і виявляти зміни, що можуть свідчити про наявність забруднень. За допомогою датчиків та цифрових платформ можна вимірювати рівень розчинених речовин, показники рН, концентрацію різних забруднювачів тощо. Такий постійний моніторинг дозволяє оперативно реагувати на забруднення та приймати заходи для їх ліквідації.

Цифровий моніторинг дозволяє збирати дані про біологічні показники та екосистемні процеси в водних середовищах. Наприклад, за допомогою датчиків можна виміряти рівень кисню у воді, виявляти зміни в біологічному розмаїтті та відстежувати

вплив людської діяльності на водні екосистеми. Це дозволяє оцінити стан водних ресурсів та приймати заходи для їх збереження та відновлення. Цифровий моніторинг може бути використаний для забезпечення безпеки питної води та контролю за харчовою безпекою. Шляхом постійного моніторингу параметрів якості води у системах водопостачання можна виявляти відхилення від нормативних значень та оперативно реагувати на них. Крім того, цифрові технології, такі як Інтернет речей (IoT) та сенсорні мережі, можуть використовуватись для моніторингу харчових продуктів та раннього виявлення можливих джерел забруднення.

Висновок. У цій статті було розглянуто тему цифрового моніторингу якості води і його потенціал для вдосконалення процесів вимірювання, збору та аналізу даних щодо якості водних ресурсів. Дослідження показали, що використання цифрових технологій, таких як сенсорні мережі, Інтернет речей, цифрові платформи та датчики, має численні переваги порівняно з традиційними методами моніторингу.

Цифровий моніторинг дозволяє отримувати високочастотні та реальні дані про якість води, що дозволяє виявляти забруднення та зміни в екологічному стані водних систем. Це сприяє оперативній реакції на потенційні проблеми та покращенню ефективності управління водними ресурсами. Крім того,

цифрові технології дозволяють відстежувати стан води в реальному часі, що є важливим для забезпечення безпеки водопостачання та захисту здоров'я громади.

Традиційні методи моніторингу мають свої обмеження, такі як складність отримання високочастотних даних, підвищена залежність від людського фактору та обмежена покриття водних систем. Цифровий моніторинг дозволяє уникнути цих обмежень шляхом автоматизованого збору та передачі даних, аналізу в реальному часі та використання сучасних алгоритмів машинного навчання для обробки інформації.

Цифровий моніторинг також відкриває нові можливості для співпраці та обміну даними між різними зацікавленими сторонами, такими як водокористувачі, оператори водних систем, науковці та урядові органи. Це сприяє більш ефективному управлінню водними ресурсами та покращенню прийняття рішень на основі об'єктивних даних.

У підсумку, цифровий моніторинг якості води є важливим інструментом для забезпечення ефективного управління водними ресурсами, виявлення забруднень, оцінки екологічного стану та забезпечення безпеки водопостачання. Ці технології відкривають нові перспективи для вдосконалення процесів моніторингу та забезпечення сталого використання водних ресурсів.

Література

1. Bernhardt, E. S., et al. The metabolic regimes of flowing waters. *Limnology and Oceanography*, 62(S1). 2017. S.99-S118.
2. Khan, U. T., et al. A review of water quality monitoring and analysis methods. *Water Science and Technology*, 79(6). 2019. S.1103-1117.
3. Sukhija, M., & Chopra, A. Internet of Things (IoT)-enabled water quality monitoring systems: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(6). 2019. S. 5456-5472.
4. Hu, W., et al. Applications of GIS and remote sensing techniques in water resources management: A review. *Water*, 12(8). 2020. S. 2319.
5. Hlavinek, P., et al. *Water Quality Monitoring: A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programs*. Elsevier. 2018.
6. Jang, H., & Lee, J. Water quality monitoring and management: a review on big data analytics and landscape tools. *Journal of Water and Health*, 14(3). 2016 S.349-366.
7. Khan, U. T., et al. A review of water quality monitoring and analysis methods. *Water Science and Technology*, 79(6). 2019. S.1103-1117.
8. WaterBot. "WaterBot – Water Quality Monitoring and Control". веб-сайт: <https://www.waterbot.net/> (Дата звернення 15.07.2023)
9. Jones, S., & Brown, R. Digital Sensors for Water Quality Monitoring: A Review. *Sensors*, 18(9)ю 2018. S.2882.
10. Zhang, L., et al. Application of Geospatial Sensor Network in Water Quality Monitoring. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(6). 2017. S.173.
11. Chen, Y., et al. Intelligent Water Quality Monitoring System based on Artificial Intelligence. *Journal of Physics: Conference Series*, 1609(1). 2020. S.2001.
12. Johnson, R. D., et al. Digital Water Monitoring: Enhancing Water Quality Monitoring through Sensor Networks. *Environmental Science & Technology*, 53(2). 2019. S.661-672.
13. Jiao, J., et al. Calibration and validation of water quality sensors for long-term data collection in freshwater ecosystems. *Journal of Hydrology*, 570. 2019. S.224-235.
14. Gao, S., et al. Accuracy Assessment of Low-Cost Water Quality Sensors under Various Hydrologic and Environmental Conditions. *Sensors*, 19(18), 2019. S. 3846.