

DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-2\(94\)-215-223](https://doi.org/10.26642/ten-2024-2(94)-215-223)
УДК 504.4:556.5:681.518

Г.В. Кірейцева, к.е.н., доц., докторант
Державний університет «Житомирська політехніка»

Вимоги до технічних засобів автоматизованої системи вимірювання гідрохімічних параметрів поверхневих вод із застосуванням IoT-технологій

Обґрунтовано вимоги до технічних засобів автоматизованої системи вимірювання гідрохімічних параметрів поверхневих вод з використанням сучасних сенсорних технологій та IoT-рішень для забезпечення безперервного збору, передачі та централізованого зберігання даних моніторингу. Проведено системний аналіз даних моніторингу водних об'єктів Житомирської територіальної громади, що дозволив визначити пріоритетні показники для автоматизованого контролю. До них належать: загальні фізико-хімічні параметри (рН, каламутність, електропровідність), біогенні елементи (азот амонійний, нітрати, фосфати), специфічні забруднювачі (залізо, марганець) та органічні показники забруднення (БСК, ХСК). Детально проаналізовано принципи роботи основних типів датчиків: електрохімічних, оптичних, кондуктометричних та іон-селективних. Обґрунтовано ключові вимоги до технічних засобів та до їх характеристик, враховуючи діапазони вимірювань, точність, часову стабільність, стійкість до температурних коливань та необхідність регулярного калібрування. Окрему увагу приділено параметрам передачі даних, використанню енергоефективних рішень та антибросаючому захисту сенсорів.

Розроблено рекомендації щодо оптимального розміщення та комплектації 10 автоматизованих станцій моніторингу, які враховують гідрологічні особливості контрольних точок та рівень техногенного навантаження. Запропоновано диференційований підхід до комплектації станцій датчиками залежно від специфіки кожного місця встановлення. Визначено регламент технічного обслуговування, що включає регулярне калібрування, заміну електродів і мембран, а також періодичне очищення сенсорів для забезпечення точності вимірювань.

Важливим аспектом впровадження є інтеграція системи з хмарними сервісами для централізованого зберігання та обробки отриманих даних. Це забезпечує оперативний доступ до результатів моніторингу та можливість аналітичного прогнозування. Запропонована система автоматизованого моніторингу дозволить значно підвищити ефективність контролю за якістю поверхневих вод, мінімізувати час реагування на аварійні ситуації та забезпечити дотримання європейських стандартів якості води.

Отримані результати є основою для подальшого вдосконалення системи шляхом інтеграції алгоритмів машинного навчання для обробки даних та розробки моделей прогнозування динаміки забруднень. Впровадження такої системи створить умови для сталого управління водними ресурсами та зменшення антропогенного впливу на довкілля.

Ключові слова: *автоматизована система моніторингу; гідрохімічні параметри; сенсорні датчики; IoT-технології; якість поверхневих вод.*

Актуальність теми. Сучасні тенденції у сфері моніторингу якості води в Україні характеризуються активною адаптацією нормативно-правової бази до вимог Водної рамкової директиви ЄС та впровадженням інноваційних технологій контролю водних об'єктів [1, 2]. Особливої актуальності набуває розвиток автоматизованих систем моніторингу з використанням IoT-технологій та сенсорних пристроїв, враховуючи мультипараметричні датчики, оптичні та електрохімічні сенсори, що забезпечують контроль якості води в режимі реального часу. Технічними характеристиками таких систем є точність вимірювань до 0,1 % від діапазону, час відгуку менше 1 секунди та можливість одночасного моніторингу до 15 параметрів якості води, хоча їх впровадження супроводжується певними технічними викликами, пов'язаними з точністю вимірювань та надійністю передачі даних [3, 4]. В умовах зростаючого антропогенного навантаження на водні об'єкти та необхідності забезпечення ефективного управління водними ресурсами, вдосконалення систем вимірювання гідрохімічних параметрів за допомогою автоматизованих датчиків контролю стає пріоритетним напрямом розвитку екологічного моніторингу [5, 6].

Технічна обґрунтованість такого вдосконалення підтверджується дослідженнями українських науковців, які виявили критичну тенденцію зростання антропогенного навантаження на водні об'єкти України. Зокрема, як зазначають дослідники басейну річки Південний Буг, основними факторами погіршення якості води є діяльність небезпечних промислових підприємств (з середнім показником скиду забруднюючих речовин 250–300 м³/добу) та інтенсифікація сільського господарства, що призводить до постійної деградації водних ресурсів [7]. На якість поверхневих вод суттєво впливають застарілі очисні

спорути (з ефективністю очищення лише 45–60 % за нормативних 95 %) та неконтрольовані скиди неочищених стічних вод, що особливо гостро проявляється в басейні річки Західний Буг, де зафіксовано значне погіршення як хімічних, так і мікробіологічних показників якості води [8]. На прикладі Київського водосховища встановлено посилення процесів евтрофікації внаслідок комбінованого впливу сільськогосподарської діяльності та урбанізації, що призводить до перевищення гранично допустимих концентрацій біогенних елементів у 2,5–3 рази та негативно впливає на біорізноманіття водних екосистем [9].

Інженерно-технічне вирішення зазначених проблем потребує впровадження автоматизованих систем моніторингу водних об'єктів, що стає критично важливим для виконання вимог Водної рамкової директиви ЄС [10], що підтверджується результатами численних європейських досліджень щодо інтеграції інноваційних технологій спостереження та моделювання з традиційними методами контролю [11]. Особливого значення набуває розробка та впровадження нових інструментів моніторингу, які здатні забезпечити більш ефективний збір та аналіз даних для оцінки екологічного стану водних об'єктів з частотою вимірювань від 1 хвилини до 24 годин, при цьому важливим аспектом залишається створення централізованих систем зберігання та обробки отриманої інформації з використанням хмарних технологій та розподілених баз даних [12]. Системний аналіз існуючих методів ручного відбору проб та лабораторних досліджень якості води виявляє низку суттєвих технологічних обмежень, що впливають на достовірність та ефективність моніторингу водних об'єктів. Ключовою проблемою залишається забезпечення простежуваності та відтворюваності даних через потенційні помилки, що виникають під час польового відбору проб та їх подальшої обробки в лабораторних умовах, де похибка вимірювань може досягати 15–20 % [13, 14]. Відсутність уніфікованих підходів до стандартизації методів аналізу може призводити до неузгодженості результатів, особливо під час дослідження нових забруднюючих речовин, що ускладнює процес розробки та впровадження інноваційних методик [15].

Технологічний процес контролю якості води враховує комплекс операцій з відбору (використання автоматичних пробовідбірників з програмованим інтервалом від 15 хвилин до 24 годин), консервації (застосування спеціальних реагентів та температурних режимів від $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$), зберігання та транспортування проб, які можуть суттєво впливати на точність визначення концентрацій досліджуваних речовин [16]. Порівняльні дослідження показують, що ручні методи характеризуються більшою варіабельністю результатів (коефіцієнт варіації 8–12 %) порівняно з автоматизованими процедурами (коефіцієнт варіації 2–4 %), що підтверджується, зокрема, при аналізі вмісту фенолів, де коефіцієнти варіації для ручних методів значно перевищують показники автоматизованих систем [17].

Техніко-економічний аналіз демонструє, що традиційні методи вимагають значних витрат часу (в середньому 4–6 годин на один повний цикл аналізу) та матеріальних ресурсів (близько 15–20 різних реагентів для повного аналізу), враховуючи реактиви та працю кваліфікованого персоналу. Впровадження автоматизованих систем аналізу дозволяє досягти суттєвого скорочення трудовитрат (до 70 %) та зменшення використання реагентів (до 40 %), що особливо актуально під час проведення масових аналізів [18]. Автоматизовані системи також забезпечують значне підвищення продуктивності аналізу – до 60–80 проб на годину проти 8–10 при ручному аналізі. Таким чином, перехід до автоматизованих систем вимірювання гідрохімічних параметрів є обґрунтованим інженерно-технічним рішенням для підвищення ефективності та достовірності моніторингу якості поверхневих вод. Аналіз технічного забезпечення існуючої системи моніторингу в Україні демонструє суттєвий розрив між наявними можливостями та вимогами сучасних стандартів контролю якості води. Зокрема, з 58 пріоритетних забруднюючих речовин, визначених відповідно до вимог ЄС, наявне обладнання дозволяє контролювати лише 13 параметрів, що становить 22,4 % від необхідного обсягу вимірювань [19]. При цьому основу парку аналітичного обладнання становлять фотометри і спектрофотометри (35 % методик), хроматографи (20 %) та атомно-абсорбційні спектрометри (10 %), що обмежує можливості визначення специфічних забруднювачів [20].

Отже, виявлені проблеми існуючої системи моніторингу якості поверхневих вод свідчать про нагальну потребу в її модернізації шляхом впровадження сучасних автоматизованих засобів вимірювання. Це підтверджується як технічними обмеженнями наявного обладнання, так і економічною доцільністю автоматизації. З інженерно-технічної точки зору, впровадження автоматизованих систем вимірювання гідрохімічних параметрів з використанням сучасних сенсорних технологій та IoT-рішень дозволить не лише підвищити точність та достовірність моніторингу, але й забезпечити виконання вимог європейських стандартів щодо контролю якості водних ресурсів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор. Останні досягнення в технологіях моніторингу якості води зосереджені на вдосконаленні збору даних у реальному часі, покращенні можливостей датчиків та інтеграції інноваційних систем зв'язку. Ці технології спрямовані на надання більш ефективних, рентабельних і комплексних рішень моніторингу. Важливий внесок у розвиток систем автоматизованого моніторингу якості води зробили численні вітчизняні та закордонні дослідники. Як свідчить аналіз публікацій О'Грейді та ін. [21], спостерігається стрімке зростання досліджень у сфері розробки та впровадження сенсорних систем для моніторингу водних об'єктів. Останні розробки М.Банна [22], Ю.Парка [23], Г.Сілва [24] та інших підкреслюють важливість моніторингу у реальному часі за допомогою

передових датчиків, які вимірюють такі параметри, як рН, каламутність, розчинений кисень і провідність. Ці датчики все частіше встановлюються в системах розподілу та природних водоймах, хоча залишаються проблеми з точки зору вартості та широкомасштабного використання. Вивченням IoT і бездротових сенсорних мереж (WSN) займаються А.Алшамі [14], Й.Сінг [25] та інші, які дослідили, що інновації IoT, зокрема бездротові технології, такі як Sigfox і Zigbee, покращують можливості моніторингу в реальному часі. Ці системи покращують зв'язок і керування даними, хоча проблеми з точністю датчиків і оптимізацією енергоспоживання залишаються.

Сьогодні для контролю якості води використовують сучасні технології. Спеціальні датчики постійно збирають дані про стан води, а комп'ютерні системи та штучний інтелект допомагають їх аналізувати. Це дозволяє краще розуміти якість води та швидше виявляти проблеми. Проте таке обладнання коштує дорого, іноді показує неточні результати, і його важко встановити всюди, де потрібно. Щоб вирішити ці проблеми, науковці та інженери з різних галузей працюють над вдосконаленням цих технологій.

Метою статті є обґрунтування технічних вимог до системи автоматизованого вимірювання гідрохімічних параметрів поверхневих вод та розробка рекомендацій щодо вибору оптимального набору сенсорних датчиків для моніторингу пріоритетних забруднюючих речовин.

Викладення основного матеріалу. Аналіз даних моніторингу поверхневих вод Житомирської територіальної громади за 2022–2023 роки дозволив визначити основні джерела та характер забруднень водних об'єктів. Встановлено, що домінуючим фактором антропогенного навантаження є житлово-комунальне господарство, на яке припадає 91 % (12,091 млн м³) загального водоспоживання, тоді як внесок промислового та сільськогосподарського секторів становить 6,7 % та 0,6 % відповідно. У 2023 році загальний обсяг скинутих зворотних вод у поверхневій водоймі досяг 15,368 млн м³, з яких 98,2 % пройшли очистку на комунальних очисних спорудах [26].

Ідентифіковано основні потенційні джерела забруднення водних об'єктів, серед яких найбільше впливають підприємства з високою інтенсивністю водокористування у технологічних процесах. Серед них: КП “Житомирводоканал” (централізоване водовідведення), КП “Житомиртеплокомуненерго” (теплові та хімічно забруднені стоки), ТОВ “Житомирський картонний комбінат” (інтенсивне промислове водокористування), ПАТ “Житомирський маслозавод” (органічно забруднені стоки харчового виробництва), ТДВ “Житомирський завод скловиробів” та ПАТ “Житомирський комбінат силікатних виробів” (промислові стоки з підвищеним вмістом хімічних речовин) [27]. Дослідження якісного складу зворотних вод виявило стійку тенденцію до перевищення нормативних показників за низкою компонентів. Зокрема, протягом 2022–2023 років зафіксовано значні обсяги скидів сухого залишку (8231 т і 5547 т відповідно), хлоридів (2764 т і 2079 т), сульфатів (927 т і 614 т) та нітратів (664 т і 473 т). Особливе занепокоєння викликає різке зростання концентрації марганцю у воді водозабору «Відсічне» з 0,3 до 4,0 мг/л, що суттєво перевищує допустимі норми [28]. Критичність ситуації посилюється незадовільним технічним станом системи водовідведення. З 2514 підприємств-водокористувачів лише 7 % обладнані локальними очисними спорудами, що призводить до надходження на комунальні очисні споруди стічних вод з понаднормативними концентраціями забруднюючих речовин. У 2022 році зафіксовано аварійні скиди неочищених стічних вод обсягом 2,8 тис. м³ у р. Тетерів та її притоку р. Кам'янки, а також скид 111,2 тис. м³ промивних вод без очистки [28].

На основі проведеного аналізу обґрунтовано перелік пріоритетних показників для впровадження автоматизованого контролю, який містить:

- загальні фізико-хімічні параметри (рН, каламутність, електропровідність), що характеризують загальний стан водного середовища;
- біогенні елементи (азот амонійний, нітрати, фосфати), які є індикаторами антропогенного забруднення;
- специфічні забруднювачі (залізо загальне, марганець), концентрації яких стабільно перевищують нормативи;
- показники органічного забруднення (ХСК, БСК), що відображають навантаження на водні екосистеми.

Такий комплексний підхід до вибору контрольованих параметрів забезпечить ефективний моніторинг якості води та своєчасне виявлення критичних рівнів забруднення водних об'єктів. Виявлені особливості забруднення водних об'єктів Житомирської ТГ та визначені пріоритетні показники якості води зумовлюють необхідність обґрунтування вимог до технічних засобів автоматизованих сенсорних систем моніторингу. Специфіка промислових підприємств регіону, наявність аварійних скидів та значні коливання концентрацій забруднюючих речовин визначають особливі вимоги до характеристик вимірювального обладнання. Принципи роботи основних типів датчиків, що використовуються в автоматизованих системах моніторингу якості води, визначають їх технічні характеристики та особливості експлуатації (табл. 1). Аналіз принципів роботи датчиків, що використовуються в автоматизованих системах моніторингу якості води, дозволив систематизувати їх основні типи – електрохімічні, оптичні, кондуктометричні та іон-селективні, кожен з яких має свої переваги та експлуатаційні обмеження.

Принципи роботи датчиків автоматизованого моніторингу якості води

Тип датчика	Принцип роботи	Переваги	Обмеження
Електрохімічні (водневий показник – рН), окисно-відновний потенціал – RedOx)	Вимірювання різниці потенціалів між вимірювальним та порівняльним електродами	Висока точність, швидкий відгук	Необхідність регулярного калібрування, чутливість до температури
Оптичні (каламутність, розчинений кисень)	Вимірювання інтенсивності розсіяного поглинутого світла	Стабільність показань, мінімальне обслуговування	Чутливість до забруднення оптичних елементів
Кондуктометричні (електропровідність)	Вимірювання електричної провідності між електродами	Простота конструкції, надійність	Температурна залежність, вплив поляризації
Іон-селективні (біогенні елементи)	Зміна потенціалу мембрани при взаємодії з цільовими іонами	Висока селективність	Обмежений термін служби мембран, необхідності калібрування

Джерело: розроблено автором

Вибір принципу вимірювання для кожного параметра якості води має здійснюватися з урахуванням як метрологічних характеристик (точність, чутливість, селективність), так і особливостей експлуатації датчиків в автоматизованих системах моніторингу (стабільність, необхідність обслуговування, енергоспоживання). На основі визначених пріоритетних забруднюючих речовин та специфіки їх моніторингу запропоновано структурування технічних вимог до сенсорних датчиків (табл. 2).

Таблиця 2

Технічні вимоги до сенсорних датчиків системи моніторингу поверхневих вод

Характеристика	Параметр / Показник	Обґрунтування вимоги
Діапазони вимірювань	рН: 0–14 од.	Необхідність контролю повного діапазону можливих значень
	Електропровідність: 0–2000 мкСм/см	Діапазон охоплює типові значення для поверхневих вод та можливі перевищення
	Каламутність: 0–1000 NTU	Врахування пікових значень під час паводків та аварійних скидів
	Розчинений кисень: 0–20 мг/л	Контроль кисневого режиму водойм
	Марганець: 0–5 мг/л	З урахуванням зафіксованих перевищень до 4 мг/л
Точність вимірювань	рН: $\pm 0,1$ од.	Відповідно до вимог моніторингу якості води
	Електропровідність: ± 1 %	Забезпечення достовірності даних
	Каламутність: ± 2 %	Точність, достатня для оперативного контролю
	Час відгуку: < 30 с	Забезпечення оперативності реагування
Умови експлуатації	Температура: $-5...+45$ °C	Кліматичні умови регіону
	Глибина занурення: до 10 м	Типові умови встановлення датчиків
	Захист: IP68	Повний захист від води та пилу
	Антиобростаючий захист	Запобігання біобростанню
Енергетичне забезпечення	Напруга живлення: 12/24В	Стандартне живлення
	Автономність: > 30 діб	Мінімальний період між обслуговуванням
	Резервне живлення: так	Забезпечення безперервності моніторингу
Передача даних	Частота вимірювань: 15 хв	Оптимальний інтервал для виявлення змін
	Протокол: GSM/GPRS	Наявність покриття в регіоні
	Формат даних: XML/JSON	Сумісність з існуючими системами
	Буферна пам'ять: > 30 діб	Збереження даних при втраті зв'язку
	ІоТ-платформа: підтримка стандартних ІоТ-протоколів (MQTT, HTTP)	Інтеграція з хмарними сервісами

Джерело: розроблено автором

Обґрунтовано комплекс технічних вимог до сенсорних датчиків системи моніторингу поверхневих вод, що включають діапазони вимірювань (рН: 0–14 од., електропровідність: 0–2000 мкСм/см, каламутність: 0–1000 NTU), точність (рН: $\pm 0,1$ од., електропровідність: ± 1 %), умови експлуатації (температура: $-5...+45$ °С, захист IP68), параметри енергозабезпечення (автономність > 30 діб) та передачі даних (частота вимірювань 15 хв). Визначені технічні характеристики враховують реальні діапазони забруднень водних об'єктів, необхідність раннього виявлення аварійних ситуацій, кліматичні умови експлуатації та вимоги до оперативності отримання даних.

На основі обґрунтованих технічних вимог до сенсорних датчиків розроблено комплекс рекомендацій щодо їх практичного впровадження у систему моніторингу поверхневих вод Житомирської ТГ. З урахуванням специфіки забруднення водних об'єктів та виявлених джерел забруднення, запропоновано набір вимірювального обладнання (табл. 3).

Таблиця 3
Рекомендації щодо розміщення та комплектації автоматизованих станцій моніторингу

№ з/п	Контрольна точка	Обґрунтування розміщення	Рекомендований набір датчиків	Контрольовані параметри
Водосховище «Відсічне»				
1.	Зона водозабору	Контроль якості питної води	Комбінований електрод; оптичний датчик; 4-електродний датчик	рН, RedOx; каламутність, розчинений кисень; електропровідність
2.	Місце основного притоку	Виявлення забруднень, що надходять у водосховище	Оптичний сенсор; Іон-селективні електроди	Каламутність, розчинений кисень; біогенні елементи
3.	Зона техногенного впливу	Моніторинг впливу промислових об'єктів	Вольтамперометричні датчики; іон-селективні електроди	Важкі метали; біогенні елементи
Річка Тетерів				
4.	Вище міста (фоновий створ)	Визначення фонових показників	Комбінований електрод; оптичний датчик	рН, RedOx; каламутність, розчинений кисень
5.	Нижче скиду КП «Житомирводоканал»	Контроль впливу комунальних стоків	Іон-селективні електроди; оптичний сенсор	Біогенні елементи; розчинений кисень
6.	Місце впадіння р. Кам'янка	Контроль впливу притоки	Комбінований електрод; 4-електродний датчик	рН, RedOx; електропровідність
7.	Замикаючий створ нижче міста	Оцінка сумарного впливу міста	Повний комплект датчиків	Всі параметри
Річка Кам'янка				
8.	Вище промислової зони	Фоновий моніторинг	Комбінований електрод; оптичний датчик	рН, RedOx; каламутність
9.	Нижче скидів підприємств	Контроль промислових скидів	Вольтамперометричні датчики; іон-селективні електроди	Важкі метали; біогенні елементи
10.	Перед впадінням у р. Тетерів	Оцінка впливу на основний водотік	Повний комплект датчиків	Всі параметри

Джерело: розроблено автором

Для водосховища «Відсічне» та річок Тетерів і Кам'янка розроблено план розміщення автоматичних станцій контролю якості води. При виборі місць для станцій врахували як природні особливості водойм, так і розташування джерел забруднення. Кожна станція оснащена різними датчиками, залежно від її

розташування: у верхній течії, де вода найчистіша, встановлено прості датчики, які вимірюють основні показники (кислотність, мутність води та її електропровідність), а у місцях, де вода найбільше забруднюється, та у замикаючих створах встановлено більше датчиків, які можуть виявляти різні види забруднень.

Такий підхід дозволяє ефективно стежити за якістю води на всій протяжності водойм, враховуючи особливості кожного місця спостереження. Для забезпечення надійної роботи системи моніторингу необхідно дотримуватися таких вимог щодо обслуговування обладнання:

- щотижнева перевірка працездатності датчиків та очистка від механічних забруднень;
- щомісячне калібрування рН-електродів та іон-селективних датчиків;
- квартальна заміна електролітів та мембран у електрохімічних датчиках;
- піврічна повірка всіх вимірювальних каналів;
- щорічна профілактика систем енергозабезпечення та передачі даних, враховуючи перевірку працездатності IoT-модулів та їх з'єднання з централізованою системою збору даних.

Запропонована система розміщення та обслуговування датчиків забезпечить безперервний контроль якості води та своєчасне виявлення потенційних забруднень на найбільш критичних ділянках водних об'єктів.

Отже, розроблена система автоматизованого моніторингу якості поверхневих вод Житомирської ТГ містить 10 контрольних точок з диференційованим набором датчиків, технічні характеристики яких обґрунтовані відповідно до специфіки забруднень та умов експлуатації. Запропонована система регламентного обслуговування вимірювального обладнання забезпечить надійність та достовірність моніторингу на критичних ділянках водних об'єктів.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У результаті проведеного дослідження обґрунтовано технічні вимоги та розроблено практичні рекомендації щодо впровадження автоматизованої системи вимірювання гідрохімічних параметрів поверхневих вод на базі IoT-технологій, що забезпечить централізований збір та обробку даних моніторингу в режимі реального часу. На основі аналізу даних моніторингу Житомирської ТГ встановлено критичний рівень забруднення водних об'єктів, що підтверджується значними перевищеннями нормативних показників за вмістом марганцю (до 4,0 мг/л), сухого залишку (8231 т), хлоридів (2764 т) при недостатній ефективності існуючих очисних споруд (45–60 % при нормативі 95 %). Систематизовано принципи роботи та технічні характеристики основних типів датчиків (електрохімічних, оптичних, кондуктометричних та іон-селективних), що дозволило обґрунтувати комплекс технічних вимог до вимірювального обладнання з урахуванням реальних діапазонів забруднень та умов експлуатації.

Зокрема, визначено необхідні діапазони вимірювань (рН: 0–14 од., електропровідність: 0–2000 мкСм/см), точність (рН: $\pm 0,1$ од., електропровідність: ± 1 %), умови експлуатації (температура: $-5...+45$ °С, захист IP68) та параметри передачі даних (частота вимірювань 15 хв). Розроблено науково обґрунтовані рекомендації щодо розміщення та комплектації 10 автоматизованих станцій моніторингу з диференційованим набором датчиків, що охоплюють критичні точки водних об'єктів від фонових створів до зон максимального техногенного навантаження. Запропоновано регламент технічного обслуговування, що включає періодичність калібрування, заміни елементів та профілактичних робіт для забезпечення надійності вимірювань.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці інтелектуальних алгоритмів обробки даних моніторингу з використанням методів машинного навчання, інтеграції системи з геоінформаційними технологіями для просторового аналізу забруднень та вдосконаленні методів прогнозування якості води на основі неперервних рядів спостережень. Особливу увагу варто приділити розробці методів автоматичного виявлення аномалій у показниках якості води та прогнозування аварійних ситуацій.

Список використаної літератури:

1. Cloete N. Design of Smart Sensors for Real-Time Water Quality Monitoring / N.Cloete, R.Malekian, L.Nair // IEEE Access. – 2016. – № 4. – P. 3975–3990. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2592958.
2. Roy A. IoT Based Real-Time Spring Water Quality Monitoring System / A.Roy, S.Mukhopadhyay, S.Roy // 1st International Conference on the Paradigm Shifts in Communication, Embedded Systems, Machine Learning and Signal Processing (PCEMS). – 2022. – P. 84–87. DOI: 10.1109/PCEMS55161.2022.9807932.
3. Real-Time Water Quality Monitoring with Chemical Sensors / I.Yaroshenko, D.Kirsanov, M.Marjanovic and other // Sensors. – 2020. – № 20. DOI: 10.3390/s20123432.
4. Development of IoT for Automated Water Quality Monitoring / R.Budiarti, A.Tjahjono, M.Hariadi, M.Purnomo // International Conference on Computer Science, Information Technology and Electrical Engineering (ICOMITEE). – 2019. – P. 211–216. DOI: 10.1109/ICOMITEE.2019.8920900.
5. Automated IoT based Smart Water Quality Assessment System / D.Pant, A.Bhatt, M.Khan and other // 8th International Conference System Modeling and Advancement in Research Trends (SMART). – 2019. – P. 98–104. DOI: 10.1109/SMART46866.2019.9117271.
6. Development of Automated Real-Time Water Quality Monitoring and Controlling System in Aquarium / M.Yasruddin, M.Ismail, Z.Husin, W.Tan // IEEE 12th Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE). – 2022. – P. 241–245. DOI: 10.1109/iscaie54458.2022.9794472.

7. Козак В. Методичні аспекти оцінки стану хімічного забруднення та якості води поверхневих вод України / В.Козак, А.Товмаченко, М.Герцюк // Журнал хроматографічного товариства. – 2020. DOI: 10.15407/zht2020.66.033.
8. Назаров Н. Забруднення води в Україні: пошук можливих рішень / Н.Назаров, Г.Кук, Г.Вудгейт // Міжнародний журнал розвитку водних ресурсів. – 2004. – № 20. – С. 205–218. DOI: 10.1080/0790062042000206110.
9. Зоріна О. Наукове обґрунтування удосконалення методики еколого-гігієнічного моніторингу якості питних і природних вод / О.Зоріна // Гігієна навколишнього середовища. – 2018. – С. 29–35. DOI: 10.32402/DOVKIL2018.02.029.
10. Про встановлення рамок заходів Співтовариства в галузі водної політики: Директива Європейського Парламенту і Ради ЄС 2000/60/ЄС від 23 жовтня 2000 року. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962#Text.
11. Хільчевський В. Моніторинг води в Україні: методи оцінки якості води для різних цілей у зв'язку зі змінами в нормативно-правовій базі (2014–2021) / В.Хільчевський // Гідрологія, гідрохімія та гідроекологія. – 2021. DOI: 10.17721/2306-5680.2021.3.1.
12. Хільчевський В. Особливості нормативної оцінки якості води водних об'єктів рекреаційного призначення в Україні / В.Хільчевський, М.Забокрицька // Гідрологія, гідрохімія та гідроекологія. – 2022. DOI: 10.17721/2306-5680.2022.1.4.
13. Якість питної води в сільській місцевості: проблеми правового середовища / В.Срмоленко, О.Хафурова, М.Дейнега та ін. // Веб-конференції E3S. – 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202128009022.
14. IoT Innovations in Sustainable Water and Wastewater Management and Water Quality Monitoring: A Comprehensive Review of Advancements, Implications, and Future Directions/ A.Alshami, E.Ali, M.Elsayed and other // IEEE Access. – 2024. – № 12. – P. 58427–58453. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3392573.
15. Use of Models to Support the Monitoring Requirements in the Water Framework Directive / A.Højberg, J.Refsgaard, F.Geer and other // Water Resources Management. – 2007. – № 21. – P. 1649–1672. DOI: 10.1007/S11269-006-9119-Y.
16. Strategic monitoring for the European Water Framework Directive/ I.Allan, B.Vrana, R.Greenwood and other // Trends in Analytical Chemistry. – 2006. – № 25. – P. 704–715. DOI: 10.1016/J.TRAC.2006.05.009.
17. Towards better traceability of field sampling data/ C.Plumejeaud-Perreau, E.Quinton, C.Pignol and other // Comput. Geosci. – 2017. – № 129. – P. 82–91. DOI: 10.1016/J.CAGEO.2019.04.009.
18. Albro P. Problems in analytic methodology: sample handling, extraction and cleanup / P.Albro // Annals of the New York Academy of Sciences. – 1979. – № 320. DOI: 10.1111/j.1749-6632.1979.tb56589.x.
19. Slinkard K. Total Phenol Analysis: Automation and Comparison with Manual Methods / K.Slinkard, V.Singleton // American Journal of Enology and Viticulture. – 1977. DOI: 10.5344/ajev.1974.28.1.49.
20. Nichols Z. Sample Preparation and Diagnostic Methods for a Variety of Settings: A Comprehensive Review / Z.Nichols, C.Geddes // Molecules. – 2021. – № 26. DOI: 10.3390/molecules26185666.
21. A comprehensive review of catchment water quality monitoring using a tiered framework of integrated sensing technologies / J.O'Grady, D.Zhang, N.O'Connor, F.Regan // The Science of the Total Environment. – 2020. DOI: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.142766.
22. Online Drinking Water Quality Monitoring: Review on Available and Emerging Technologies / M.Banna, S.Imran, A.Francisque and other // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. – 2014. – № 44. – P. 1370–1421. DOI: 10.1080/10643389.2013.781936.
23. Park J. Recent Advances in Information and Communications Technology (ICT) and Sensor Technology for Monitoring Water Quality / J.Park, K.Kim, W.Lee // Water. – 2020. DOI: 10.3390/w12020510.
24. Advances in Technological Research for Online and In Situ Water Quality Monitoring / G.Silva, D.Campos, J.Brasil and other // Sustainability. – 2022. DOI: 10.3390/su14095059.
25. Singh Y. Smart Water Quality Monitoring with IoT Wireless Sensor Networks / Y.Singh, T.Walingo // Sensors. – 2024. – № 24. DOI: 10.3390/s24092871.
26. Державне агентство водних ресурсів України : офіційний сайт [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.davr.gov.ua/>.
27. Басейнове управління водних ресурсів річки Прип'ять : офіційний сайт [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://buvrzt.gov.ua/>.
28. Житомирська міська рада : офіційний сайт [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://zt-rada.gov.ua/?pages=19556>.

References:

1. Cloete, N., Malekian, R. and Nair, L. (2016), «Design of Smart Sensors for Real-Time Water Quality Monitoring», *IEEE Access*, No. 4, pp. 3975–3990, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2592958.
2. Roy, A., Mukhopadhyay, S. and Roy, S. (2022), «IoT Based Real-Time Spring Water Quality Monitoring System», *1st International Conference on the Paradigm Shifts in Communication, Embedded Systems, Machine Learning and Signal Processing (PCEMS)*, pp. 84–87, doi: 10.1109/PCEMS55161.2022.9807932.
3. Yaroshenko, I., Kirsanov, D., Marjanovic, M. et al. (2020), «Real-Time Water Quality Monitoring with Chemical Sensors», *Sensors*, No. 20, doi: 10.3390/s20123432.
4. Budiarti, R., Tjahjono, A., Hariadi, M. and M.Purnomo (2019), «Development of IoT for Automated Water Quality Monitoring», *International Conference on Computer Science, Information Technology, and Electrical Engineering (ICOMITEE)*, pp. 211–216, doi: 10.1109/ICOMITEE.2019.8920900.

5. Pant, D., Bhatt, A., Khan, M. et al. (2019), «Automated IoT based Smart Water Quality Assessment System», *System Modeling and Advancement in Research Trends (SMART)*, 8th International Conference, pp. 98–104. doi: 10.1109/SMART46866.2019.9117271.
6. Yasruddin, M., Ismail, M., Husin, Z. and Tan, W. (2022), «Development of Automated Real-Time Water Quality Monitoring and Controlling System in Aquarium», *IEEE 12th Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE)*, pp. 241–245, doi: 10.1109/iscaie54458.2022.9794472.
7. Kozak, V., Tovmachenko, A. and Hertsyuk, M. (2020), «Metodychni aspekty otsinky stanu khimichnoho zabrudnennia ta yakosti vody poverkhnevyykh vod Ukrainy», *Zhurnal khromatohrafichnoho tovarystva*, doi: 10.15407/zht2020.66.033.
8. Nazarov, N., Kuk, H. and Vudheit, H. (2004), «Zabrudnennia vody v Ukraini: poshuk mozhlyvykh rishen», *Mizhnarodnyi zhurnal rozvytku vodnykh resursiv*, No. 20, pp. 205–218, doi: 10.1080/0790062042000206110.
9. Zorina, O. (2018), «Naukove obgruntuvannia udoskonalennia metodyky ekoloho-hihienichnoho monitorynhu yakosti pytnykh i pryrodnykh vod», *Hihiena navkolyshnoho seredovyscha*, pp. 29–35, doi: 10.32402/DOVKIL2018.02.029.
10. Yevropeiskiy parlament i rada YeS (2020), *Pro vstanovlennia ramok zakhodiv Spivtovarystva v haluzi vodnoi polityky*, dyrektyva 2000/60/YeS vid 23 zhovtnia 2000 roku, [Online], available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962#Text
11. Khilchevskiy, V. (2021), «Monitorynh vody v Ukraini: metody otsinky yakosti vody dlia riznykh tsilei u zviyazku zi zminamy v normatyvno-pravovii bazi (2014–2021)», *Hidrolohiia, hidrokimiia ta hidroekolohiia*, doi: 10.17721/2306-5680.2021.3.1.
12. Khilchevskiy, V. and Zabokrytska, M. (2022), «Osoblyvosti normatyvnoi otsinky yakosti vody vodnykh ob'ektiv rekreatsiinoho pryznachennia v Ukraini», *Hidrolohiia, hidrokimiia ta hidroekolohiia*, doi: 10.17721/2306-5680.2022.1.4.
13. Iermolenko, V., Khafurova, O., Deineha, M. et al. (2021), «Yakist pytnoi vody v silskii mistsevosti: problemy pravovoho seredovyscha», *Veb-konferentsii E3S*, doi: 10.1051/e3sconf/202128009022.
14. Alshami, A., Ali, E. and Elsayed, M. (2024), «IoT Innovations in Sustainable Water and Wastewater Management and Water Quality Monitoring: A Comprehensive Review of Advancements, Implications, and Future Directions», *IEEE Access*, No. 12, pp. 58427–58453, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3392573.
15. Højberg, A., Refsgaard, J., Geer, F. et al. (2007), «Use of Models to Support the Monitoring Requirements in the Water Framework Directive», *Water Resources Management*, No. 21, pp. 1649–1672, doi: 10.1007/S11269-006-9119-Y.
16. Allan, I., Vrana, B., Greenwood, R. et al. (2006), «Strategic monitoring for the European Water Framework Directive», *Trends in Analytical Chemistry*, No. 25, pp. 704–715, doi: 10.1016/J.TRAC.2006.05.009.
17. Plumejeaud-Perreau, C., Quinton, E., Pignol, C. et al. (2017), «Towards better traceability of field sampling data», *Comput. Geosci*, No. 129, pp. 82–91, doi: 10.1016/J.CAGEO.2019.04.009.
18. Albro, P. (1979), «Problems in analytic methodology: sample handling, extraction and cleanup», *Annals of the New York Academy of Sciences*, No. 320, doi: 10.1111/j.1749-6632.1979.tb56589.x.
19. Slinkard, K. and Singleton, V. (1977), «Total Phenol Analysis: Automation and Comparison with Manual Methods», *American Journal of Enology and Viticulture*, doi: 10.5344/ajev.1974.28.1.49.
20. Nichols, Z. and Geddes, C. (2021), «Sample Preparation and Diagnostic Methods for a Variety of Settings: A Comprehensive Review», *Molecules*, No. 26, doi: 10.3390/molecules26185666.
21. O'Grady, J., Zhang, D., O'Connor, N. and Regan, F. (2020), «A comprehensive review of catchment water quality monitoring using a tiered framework of integrated sensing technologies», *The Science of the Total Environment*, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.142766.
22. Banna, M., Imran, S., Francisque, A. et al. (2014), «Online Drinking Water Quality Monitoring: Review on Available and Emerging Technologies», *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, No. 44, pp. 1370–1421, doi: 10.1080/10643389.2013.781936.
23. Park, J., Kim, K. and Lee, W. (2020), «Recent Advances in Information and Communications Technology (ICT) and Sensor Technology for Monitoring Water Quality», *Water*, doi: 10.3390/w12020510.
24. Silva, G., Campos, D., Brasil, J. et al. (2022), «Advances in Technological Research for Online and In Situ Water Quality Monitoring», *Sustainability*, doi: 10.3390/su14095059.
25. Singh, Y. and Walingo, T. (2024), «Smart Water Quality Monitoring with IoT Wireless Sensor Networks», *Sensors*, No. 24, doi: 10.3390/s24092871.
26. *Derzhavne ahentstvo vodnykh resursiv Ukrainy*, ofitsiyni sait, [Online], available at: <https://www.davr.gov.ua/>
27. *Basynove upravlinnia vodnykh resursiv richky Prypiat*, ofitsiyni sait, [Online], available at: <https://buvrzt.gov.ua/>
28. *Zhytomyrska miska rada*, ofitsiyni sait, [Online], available at: <https://zt-rada.gov.ua/?pages=19556>

Кірейцева Ганна Вікторівна – кандидат економічних наук, доцент, докторант кафедри екології та природоохоронних технологій Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-1055-1784>.

Наукові інтереси:

- екологічна безпека;
- водні ресурси;
- гідроекологія;
- сталий розвиток;
- зміни клімату.

Kyreitseva H.V.

Technical requirements for an automated system of hydrochemical parameters measurement in surface waters using iot technologies

The technical requirements for an automated system measuring hydrochemical parameters of surface waters have been substantiated, utilizing modern sensor technologies and IoT solutions to ensure continuous data collection, transmission, and centralized monitoring storage. A systematic analysis of water monitoring data from the Zhytomyr territorial community was conducted, which helped identify priority indicators for automated control. These include general physicochemical parameters (pH, turbidity, electrical conductivity), nutrients (ammonium nitrogen, nitrates, phosphates), specific pollutants (iron, manganese), and organic pollution indicators (BOD, COD).

The operational principles of main sensor types were analyzed in detail: electrochemical, optical, conductometric, and ion-selective. Key technical requirements and specifications were justified, including measurement ranges, accuracy, temporal stability, resistance to temperature fluctuations, and calibration requirements. Special attention was paid to data transmission parameters, energy-efficient solutions, and anti-fouling protection of sensors.

Recommendations were developed for the optimal placement and configuration of 10 automated monitoring stations, taking into account the hydrological characteristics of control points and the level of technogenic load. A differentiated approach to station sensor configuration was proposed, depending on the specifics of each installation site.

A maintenance protocol was established, including regular calibration, electrode and membrane replacement, and periodic sensor cleaning to ensure measurement accuracy. An important implementation aspect is the system's integration with cloud services for centralized storage and processing of collected data. This provides operational access to monitoring results and analytical forecasting capabilities.

The proposed automated monitoring system will significantly improve surface water quality control efficiency, minimize emergency response time, and ensure compliance with European water quality standards. The obtained results form the basis for further system improvement through the integration of machine learning algorithms for data processing and development of pollution dynamics prediction models.

The implementation of such a system will create conditions for sustainable water resource management and reduction of anthropogenic environmental impact.

Keywords: automated monitoring system; hydrochemical parameters; sensor devices; IoT technologies; surface water quality.

Стаття надійшла до редакції 25.09.2024.