СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ВОДИ

С. М. Юрасов, канд. техн. наук, доцент
В. В. Терземан, аспірант
Кафедра екології та охорони довкілля
urasen54@gmail.com

Дослідження зосереджене на аналізі сучасних наукових праць щодо прогнозування якості води з метою визначення актуальних тенденцій, основних проблем і викликів, а також оцінки можливостей упровадження передових підходів у сучасних умовах України.

Мета. Узагальнити сучасні наукові підходи до прогнозування якості води, виокремити ключові напрямки розвитку, визначити переваги й недоліки основних груп методів та оцінити перспективи їх ефективного застосування в Україні. Об'єкт дослідження - процес прогнозування якості вод у сучасних наукових роботах. Предмет дослідження - підходи, методи, моделі та інструменти, що використовуються у світі для прогнозування якості води. Методи – використано адаптовану методологію систематичного огляду PRISMA, а також методи візуального та порівняльного аналізу.

Якість водних ресурсів є визначальним фактором екологічної безпеки, сталого розвитку та здоров'я населення. Під впливом кліматичних змін, інтенсифікації антропогенного навантаження, урбанізації та агровиробництва спостерігається стабільне погіршення стану поверхневих і підземних вод.

У таких умовах прогнозування якості вод стає важливим інструментом превентивної екологічної політики, що відповідає вимогам Водної рамкової директиви ЄС 2000/60/ЕС [1] щодо забезпечення доступу до чистої води та належної санітарії. У багатьох країнах світу (Україна, США, Канада, Китай, Японія, держави ЄС) законодавство передбачає обов'язковість прогнозування якості вод для оцінки стану водних ресурсів та планування їх використання. Водночас нормативні акти не визначають конкретних методів прогнозування, що стимулює розвиток наукових підходів і технологій, які сьогодні формують основу для практичного застосування моделей у водному менеджменті.

У сучасних дослідженнях застосовується широкий спектр методів і інструментів для прогнозування якості води. Стрімкий розвиток цифрових технологій спричинив появу численних моделей, що істотно різняться за принципами роботи та рівнем деталізації.

Визначення актуальних тенденцій у цій сфері ускладнене через велику кількість підходів, серед яких чимало авторських методик, що зустрічаються лише в окремих публікаціях і практично не піддаються

статистичній ідентифікації. Для структурованого аналізу всі виявлені методи були умовно поділені автором на групи за основним принципом роботи, типом інструментарію чи програмного забезпечення.

До таких груп належать: AI/ML, статистичні моделі, фізико-гідрологічні моделі, ГІС-методи, дистанційне зондування, IoT та біосенсори, гібридні моделі, моделі нечіткої логіки.

Для аналізу тенденцій розвитку методів прогнозування якості води було використано базу Springer Nature Link. Пошук за ключовими словами “Water quality forecast” та “Water quality prediction” за 2020-2025 рр. проводився з фільтрами Research Article та сортуванням за релевантністю. Для кожного року було експортовано по 1000 публікацій у форматі CSV, що загалом сформувало вибірку з 6000 статей. На наступному етапі здійснено автоматизований підрахунок кількості публікацій, у назвах яких виявлені ключові слова, що відповідають різним групам методів прогнозування. На основі отриманих результатів створено підсумкову таблицю (табл. 1), у якій відображено кількість статей з відповідними ключовими словами для кожного року в межах 2020-2025 рр.

Таблиця 1 - Розподіл наукових публікацій за ключовими словами, що відображають групи методів прогнозування якості води (2020-2025)

Група методів	2020	2021	2022	2023	2024	2025
AI/ML	304	375	407	469	553	589
Statistical methods	63	67	70	83	64	59
Process-basedmodel	8	11	14	16	16	9
GIS	18	13	18	20	15	17
Remote sensing	73	94	85	94	117	112
IoT and biosensors	17	31	40	50	35	48
Hybrid	58	77	100	97	148	147
Fuzzylogic	20	30	33	26	23	20

На основі таблиці було створено графік, що відображає зміну частоти використання ключових слів, пов’язаних із різними групами методів прогнозування якості води, у публікаціях за 2020-2025 рр (рис. 1).

Аналіз графіку показав, що провідним і найбільш динамічним напрямом у прогнозуванні якості води залишаються методи на основі штучного інтелекту та машинного навчання. У 2020-2025 рр. З помітним, хоча й менш інтенсивним зростанням виділяються гібридні моделі, що поєднують декілька підходів.

В Україні використання методів прогнозування якості води перебуває

на стадії поступового розвитку та наближення до європейських стандартів управління водними ресурсами. Існує значний розрив між теоретичними можливостями сучасних моделей та їх реальною імплементацією у національну систему моніторингу, що пов'язано з технологічними та інституційними обмеженнями. Для оцінки потенціалу впровадження сучасних методів в українських умовах була сформована узагальнена таблиця (табл. 2), де наведено найпоширеніші підходи, їхні переваги та недоліки, а також відповідні прогнозні горизонти їх застосування.

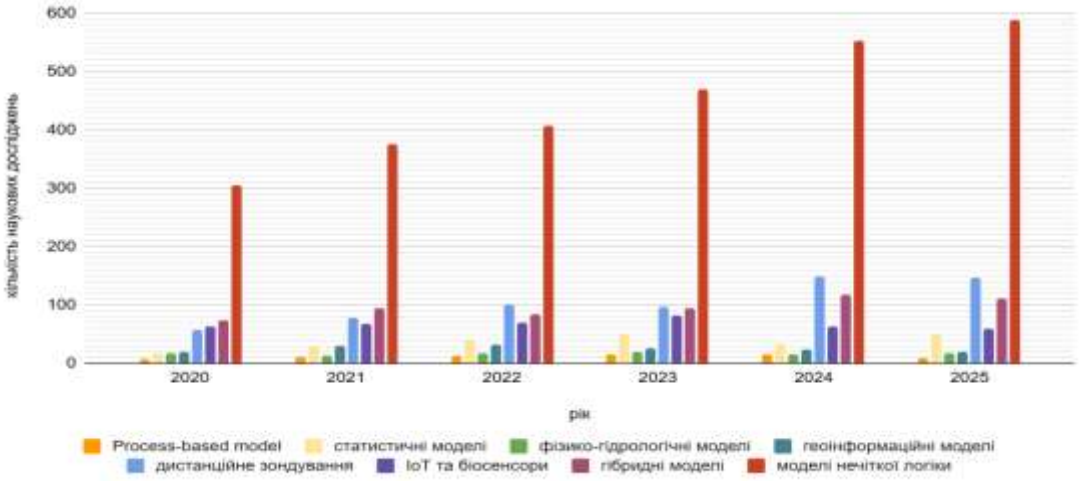

Рисунок 1 – Динаміка поширення груп методів за ключовими словами в наукових публікаціях з прогнозу якості вод за період з 2020 по 2025 рр.

Методи штучного інтелекту та машинного навчання вже поступово впроваджуються в українській практиці моніторингу та прогнозування якості води. Їхньою перевагою, особливо у воєнний час, є можливість роботи без прямого доступу до водойм, на основі історичних або дистанційних даних. Основне обмеження цих методів — «ефект чорної скриньки», що ускладнює інтерпретацію прогнозів. Використання пояснювального ШІ (XAI), зокрема SHAP і LIME, дозволяє підвищити прозорість моделей[2], однак в Україні ці підходи поки застосовуються дуже обмежено, і випадків їх використання для прогнозування якості води не виявлено.

Методи дистанційного зондування (RS) показують високу ефективність у контролі стану поверхневих вод, особливо за умов обмеженого або небезпечного польового моніторингу. Дані Sentinel, Landsat та MODIS дають змогу оцінювати стан водойм, температуру, цвітіння водоростей та зміни водної поверхні. Під час війни RS є найбільш доступним інструментом, а після війни їх інтеграція з наземними вимірюваннями може стати основою для сучасної системи моніторингу та прогнозування.

Таблиця 2 – Узагальнена таблиця найпоширеніших сучасних методів прогнозування якості води

Група методів	Переваги	Недоліки
AI, ML	Висока точність при достатньому обсязі даних; здатність враховувати нелінійні залежності; можливість онлайн-оновлення.	Вимагає великого масиву якісних даних; обмежене пояснення процесів; складність адаптації до інших водойм.
Дистанційне зондування (RS)	Велике охоплення території; доступність даних; придатний для важкодоступних регіонів.	Обмежена роздільна здатність; залежність від погодних умов; потрібна калібровка з польовими даними.
Гібридні моделі	Підвищена точність; здатні враховувати як просторові, так і часові закономірності; підвищена стійкість до неповних або шумних даних; можливість інтеграції з кліматичними сценаріями.	Висока складність реалізації та калібрування; велике навантаження на обчислювальні ресурси; потреба в експертному налаштуванні всіх компонентів (статистична, фізико-гідрологічна, машинне навчання)

Гібридні моделі в Україні поки що перебувають на етапі експериментальних досліджень, а їх розвиток обмежений нестачею даних та нестабільністю моніторингових мереж. Водночас у післявоєнний період вони мають великий потенціал, оскільки здатні підвищувати точність прогнозів, враховувати кліматичні та антропогенні зміни й поєднувати різні типи даних.

Перелік посилань

1. Council Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj/eng.

2. Randika K. Makumbura, Lakindu Mampitiya. Advancing water quality assessment and prediction using machine learning models, coupled with explainable artificial intelligence (XAI) techniques like shapley additive explanations (SHAP) for interpreting the black-box nature. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 23. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102831