
БІОХІМІЯ

УДК 504.064.3:556.114:004.85

DOI 10.31654/2786-8478-2026-BN-2-66-79

Гуменюк Г. Б.

кандидат біологічних наук, доцент
Тернопільського національного педагогічного університету
імені Володимира Гнатюка
gumenjuk@chem-bio.com.ua
orcid.org/0000-0002-7423-9968

Дух Р. М.

аспірант
Тернопільського національного педагогічного університету
імені Володимира Гнатюка
romaedge@ukr.net
orcid.org/0009-0001-0567-1896

**ІНДЕКСИ ЯКОСТІ ВОДИ ЗА ФІЗИКО-ХІМІЧНИМИ, БІОЛОГІЧНИМИ
ТА БІОХІМІЧНИМИ ПОКАЗНИКАМИ В СИСТЕМІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ**

Сучасний стан водних екосистем характеризується зростаючим антропогенним навантаженням, що проявляється у погіршенні якості поверхневих і підземних вод унаслідок промислового, сільськогосподарського та урбанізаційного впливу. До основних факторів деградації водних ресурсів належать надходження біогенних елементів, важких металів, органічних забруднювачів, а також зміни гідрологічного режиму та кліматичні коливання. У цих умовах особливої актуальності набуває розробка та вдосконалення методів інтегральної оцінки стану водних об'єктів у контексті забезпечення сталого розвитку та раціонального використання водних ресурсів. У роботі розглянуто оцінку індексів якості води (WQI) за фізико-хімічними, біологічними та біохімічними показниками, які є основою для моніторингу поверхневих і підземних вод у різних природно-географічних умовах. Здійснено порівняльний аналіз 7 найбільш поширених моделей якості води. Показано, що традиційні індексні моделі забезпечують узагальнену та зручну оцінку якості води, однак їх точність залежить від локальних гідрохімічних умов та складу біологічних показників. Окремо розглянуто можливості застосування методів машинного навчання для підвищення точності оцінювання якості води та класифікації її стану на основі скорочених наборів фізико-хімічних, біологічних і біохімічних параметрів. Встановлено, що використання алгоритмів машинного навчання підвищує ефективність екологічного моніторингу, знижує витрати на лабораторні дослідження та забезпечує оперативне оцінювання стану водних об'єктів. Встановлено, що інтеграція класичних індексних моделей із сучасними методами машинного навчання підвищує ефективність екологічного моніторингу та є важливим інструментом реалізації принципів сталого розвитку у сфері управління водними ресурсами, оскільки сприяє їх раціональному використанню та охороні. Отримані результати підтверджують перспективність розвитку комбінованих підходів

для удосконалення систем управління та охорони водних ресурсів в умовах зростаючого антропогенного навантаження та кліматичних змін.

Ключові слова. *якість води; індекс якості води (WQI); моніторинг водних ресурсів; машинне навчання; поверхневі води; екологічний моніторинг; водні екосистеми, сталий розвиток, біологічні та біохімічні показники.*

Постановка проблеми. Вода є ключовим компонентом навколишнього середовища; але якість поверхневих і підземних вод вже давно погіршується через природну та антропогенну діяльність. Природними факторами, що впливають на якість води, є гідрологічні, атмосферні, кліматичні, топографічні та літологічні фактори [38, 56]. Прикладами антропогенної діяльності, яка негативно впливає на якість води, є гірничодобувна промисловість, тваринництво, виробництво та утилізація відходів (промислових, комунальних та сільськогосподарських), збільшення стоку осаду або ерозія ґрунту внаслідок зміни землекористування [34] та забруднення важкими металами [47]. Останнім часом країни, що розвиваються, зіткнулися зі значними проблемами у захисті якості води, намагаючись покращити водопостачання та санітарію [12, 42]. Навіть розвинені країни борються за підтримку або покращення стану якості води, стикаючись з такими проблемами, як збагачення поживними речовинами та евтрофікація водних ресурсів [3], а також забезпечення водопостачанням та водовідведенням зростаючого населення.

Річки по всьому світу є життєво важливим джерелом прісної води для навколишнього середовища, економіки та суспільства [16,25,44]. Однак ці прісноводні екосистеми наразі страждають від кількох проблем, таких як надмірна експлуатація, зміна клімату та антропогенне забруднення [11]. На якість води в річках впливають природні (опади та ерозія) та антропогенні процеси (такі як урбанізація, сільське господарство та виробництво) [8,14,49]. Якість води – це нелінійне та нестаціонарне явище, яке охоплює складні взаємозв'язки між природними та антропогенними процесами, і тому безперервний моніторинг якості води є основоположним для розробки стратегій відновлення та збереження річок і підтримки їх сталого управління [30]. З іншого боку, якість води суттєво пов'язана зі здоров'ям людей.

Класифікація якості є вирішальною та корисною для моніторингу, прогнозування та управління водними ресурсами [48]. У цьому випадку індекс якості води (WQI) є універсальним показником. WQI являє собою точну математичну функцію, яка інтегрує багатовимірні ефекти, виражені як одне значення [57]. Моделі індексу якості води (WQI) базуються на функціях агрегації, які дозволяють аналізувати великі набори даних про якість води, що змінюються в часі та просторі, для отримання єдиного значення, тобто індексу якості води, який вказує на якість водойми. Вони привабливі для установ з управління водними ресурсами, оскільки відносно прості у використанні та перетворюють складні набори даних про якість води в єдиний показник якості води, який легко зрозуміти. WQI зазвичай складається з чотирьох процесів або компонентів. Спочатку вибираються параметри якості води, що цікавлять. По-друге, для кожного параметра якості води концентрації перетворюються на однозначний безрозмірний підіндекс. По-третє, визначається ваговий коефіцієнт для кожного параметра якості води, і по-четверте, остаточний однозначний індекс якості води розраховується за допомогою функції агрегації з використанням підіндексів та вагових коефіцієнтів для всіх параметрів якості води. Було розроблено багато різних моделей WQI з варіаціями в структурі моделі, включених параметрах та пов'язаних з ними вагових коефіцієнтах, а також методах, що використовуються для субіндексації та агрегації [29, 50].

Аналіз останніх досліджень і публікацій . Більшість компонентів моделі WQI були розроблені на основі експертних думок та місцевих рекомендацій [51], і тому багато моделей є регіонально-специфічними. Багато дослідників посилаються на

проблеми невизначеності моделей WQI [31]. Хоча невизначеність є неминучим явищем у будь-якій математичній моделі [35], усі чотири етапи аналізу якості життя (WQI) можуть сприяти невизначеності моделі. У дослідженні [23] були розроблені моделі машинного навчання, регресії та класифікації для оцінки екосистемного WQI, розробленого раніше для річки Сантьяго-Гвадалахара, який включав вимірювання 17 параметрів якості води, оскільки існували попередні знання про високоточну структуру алгоритму WQI [1, 19, 33]. Метою цього дослідження було оцінити потенційне використання методів машинного навчання з контрольованою структурою для прогнозування екосистемно-специфічного показника якості води (WQI), розробленого раніше для річки Сантьяго-Гвадалахара у Мексиці [13]. Цей WQI наразі використовується місцевим урядом штату Халіско (Мексика), для повідомлення про стан та тенденції якості води широкому загалу [20]. Оригінальний алгоритм WQI був розроблений з використанням самоадаптивного підходу, заснованого на основі даних про якість води [13]. Для зменшення кількості значущих параметрів, необхідних для прогнозування WQI, було використано модель множинної лінійної регресії з використанням 12 параметрів. Значення $R^2 = 0,9992$ (коефіцієнт детермінації) свідчить про те, що модель пояснює 99,92% варіації даних, тоді як лише 0,08% залишаються неврахованими, що вказує на дуже високу точність апроксимації та майже повну відповідність моделі вихідним даним. Ці результати можна порівняти з результатами, отриманими [5], які використовували додаткову регресію дерева рішень для прогнозування індексу якості води з 10 параметрами, що показує $R^2 0,99$ та [27], що використовували нейронну мережу з радіальною базовою функцією, використовуючи лише шість параметрів для оцінки індексу якості води, та отримали $R^2 0,9872$.

Існують різні застосування WQI для багатьох цілей, наприклад, для захисту міського, озерного, ґрунтового середовища [52] та розробки спеціального індексу для річкової екосистеми [40]. Для визначення WQI було застосовано кілька умов та критеріїв. Наприклад, Граділья-Ернандес [26] використовував сім фізичних параметрів, тобто кисень, поживні речовини, органічні речовини, важкі метали, для розробки свого показника якості води WQI. З іншого боку, для оцінювання якості води в різних дослідженнях використовувалися дев'ять основних параметрів, серед яких концентрації алюмінію, заліза, міді, нітратів, а також показники мікробіологічного забруднення, зокрема вміст кишкової палички. Їх підбір та поєднання залежали від особливостей водного об'єкта, регіональних умов і цілей дослідження [18].

Однак програми моніторингу вимагають численних вимірювань різних параметрів якості води в різних точках відбору проб і в різний час відбору проб, і, як наслідок, створюються великі бази даних [53]. Таким чином, для оцінки екологічного стану водойми необхідні складні аналізи та інтерпретація [7, 43]. Щоб подолати цю проблему, WQI визнаний корисним інструментами для полегшення візуалізації, інтерпретації та комунікації якості води [2]. WQI широко застосовується для оцінки та класифікації якості води поверхневих та підземних водних джерел, а також для допомоги менеджерам водних ресурсів у прийнятті більш ефективних рішень [17, 22, 37].

Мета статті. Метою дослідження є аналіз та оцінка індексів якості води, що базуються на фізико-хімічних, біологічних та біохімічних показниках, а також порівняння основних моделей індексів якості води за їх структурою, набором параметрів, методами нормування та агрегації. Додатково метою є визначення особливостей застосування сучасних підходів машинного навчання для підвищення ефективності оцінювання індексів якості води та зменшення кількості необхідних параметрів без суттєвої втрати точності результатів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Оскільки WQI розраховується шляхом інтеграції кількох фізичних, хімічних, біологічних та біохімічних параметрів, спеціально відібраних за їхньою значущістю для якості води джерел води загалом [9, 47], останні зусилля зосереджені на розробці екосистемно-специфічних індексів якості

води, розроблених для конкретних умов даного джерела води та з дотриманням місцевих стандартів щодо захисту водного життя [13, 46]. Ці екосистемно-специфічні WQI розроблені для адекватного відображення просторових та часових варіацій відповідно до місцевого територіального контексту [26, 54].

Виявлено, що сім моделей домінують, охоплюючи 85% із 107 застосувань індексу якості води (WQI).

Індекс Хортона. Це один із перших інтегральних індексів якості води, запропонований для узагальненої оцінки стану поверхневих вод шляхом об'єднання кількох фізичних, хімічних і частково біологічних та біохімічних показників у єдине числове значення, що дозволяє перетворити багатовимірні дані моніторингу якості води на один узагальнений показник, що характеризує загальний екологічний стан водойми. Модель Хортона використовувалася багатьма дослідниками у багатьох різних країнах для оцінки прісних поверхневих вод. Він містить чотири стандартні компоненти WQI, тобто вибір параметрів, розрахунок субіндексу, зважування параметрів та агрегацію субіндексів [21].

Індекс Шотландського департаменту досліджень та розвитку. Модель постійно розробляється Шотландським департаментом досліджень та розвитку з 1970 року для оцінки якості поверхневих вод [51]. Індекс призначений для узагальнення фізико-хімічних показників якості води в єдиний числовий показник, що відображає загальний екологічний стан водного об'єкта. Більшість країн помірної та тропічно-субтропічного клімату застосовують цю модель завдяки її гнучкості та регіональній зручності. Наприклад, її використовували для оцінки якості поверхневих вод в Ірані [15]. Модифікована модель також використовувалася для оцінки якості річкової води у Східному Таїланді [9].

Індекс Шотландського департаменту досліджень та розвитку є однією з базових класичних моделей WQI, що вплинула на формування сучасних підходів до інтегральної оцінки якості води.

Індекс якості поверхневих вод Національного фонду санітарії США. Індекс якості поверхневих вод був розроблений Брауном у 1965 році [4] як модифікована версія моделі Хортона [36]. Він використовувався для оцінки якості поверхневих вод у різних сферах. Як і модель Хортона, він містить чотири основні компоненти WQI. Типові параметри включають: розчинений кисень, БСК (біохімічне споживання кисню), рН, нітрати, фосфати, каламутність, температура, тверді речовини та фекальні коліформи.

Індекс якості води Канадської ради міністрів навколишнього середовища. Модель була розроблена на основі моделі WQI Британської Колумбії у 2001 році [37]. У всьому світі ця модель застосовувалася до широкого кола поверхневих водойм [3, 55], завдяки гнучкості у виборі параметрів якості води, які включені до моделі. Ключовою особливістю WQI є відсутність жорстко фіксованого переліку параметрів якості води, оскільки для розрахунку можуть використовуватися будь-які фізичні, хімічні або біологічні та біохімічні показники за умови наявності для них встановлених екологічних нормативів (стандартів), з якими здійснюється їх порівняння.

Індекс Баскарона. Ця модель була розроблена Баскаронем у 1979 році для оцінки якості води на основі іспанських рекомендацій щодо якості води [50]. Модель Баскарона вважалася найкращою для оцінки якості поверхневих вод [41], оскільки призначена для узагальнення фізико-хімічних, частково біологічних та біохімічних показників якості води в єдине числове значення, що відображає загальний екологічний стан водойм. Багато країн Південної Америки прийняли її для оцінки якості поверхневих вод, зокрема, такі як Бразилія [4], Аргентина [45] та Чилі [17]. Було кілька застосувань у південноазіатському регіоні, в таких країнах, як Непал [32] та Індія [6]. Кілька країн також намагалися розробити модифіковану модель WQI на основі моделі індексу Баскарона, наприклад, Китай [50].

Малайзійський індекс якості води. У 1974 році Міністерство навколишнього середовища Малайзії розробило WQI для оцінки якості поверхневих вод та їх

класифікації на місцевому рівні. Для визначення місцевої якості води та її характеристик були застосовані національні критерії якості води Малайзії [24]. Ця модель містить чотири спільні компоненти моделей WQI. Оскільки для вимірювання показників якості води (фізичних, хімічних та біологічних, біохімічних), які включені до алгоритмів WQI, потрібен значний час, зусилля та фінансові ресурси, існує потреба в практичних обчислювальних підходах для точної та ефективної оцінки WQI. [5]. Типові параметри: розчинений кисень, біохімічне споживання кисню, хімічне споживання кисню, рН, амоній, нітрати, каламутність та загальні зважені речовини.

Витрати, пов'язані з моніторингом якості води, можна зменшити, якщо показники якості води можна оцінювати на основі менших наборів параметрів якості води, і, отже, моніторинг якості води можна поширити на ширші водозбірні зони відповідних джерел води або для моніторингу інших водойм.

Модель WQI для Західної Яви розробили модель у 2017 році [51]. Це найновіших розроблених моделей WQI в літературі. Модель WQI для Західної Яви – це сучасна регіонально-адаптована модель оцінювання якості води, розроблена для умов провінції Західна Ява (Індонезія) з урахуванням місцевих природно-екологічних особливостей та антропогенного навантаження. Модель призначена для інтегральної оцінки якості поверхневих вод шляхом об'єднання фізико-хімічних, біологічних та біохімічних показників у єдиний числовий індекс, що відображає стан водних об'єктів у конкретному регіоні. Ця модель намагалася зменшити невизначеність, яка присутня в інших моделях WQI.

З огляду на відносну простоту та легкість співвіднесення результатів, моделі WQI широко використовуються для оцінки якості води, але на сьогоднішній день розроблено багато різних версій.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Індекси якості води є ефективним інструментом для узагальнення великих масивів даних моніторингу та оцінювання екологічного стану водних об'єктів у контексті забезпечення сталого розвитку та раціонального використання природних ресурсів. Аналіз світового досвіду показав значну різноманітність моделей індексів якості води, які відрізняються набором параметрів, системами вагових коефіцієнтів та методами агрегації. Найбільш поширеними моделями є індекс якості води Хортон, індекс якості води Канадської ради міністрів навколишнього середовища, індекс якості води Баскарона та малайзійський WQI.

Встановлено, що більшість моделей індексів якості води мають регіональну специфіку та залежать від локальних стандартів якості води, типу водойм і цілей водокористування. Основними проблемами застосування індексів залишаються невизначеність результатів, складність вибору параметрів та можливість втрати частини інформації під час агрегації показників.

Досліджено, що класичні індекси якості води, такі як індекс Хортон, NSF WQI, шотландська модель, індекс Баскарона та малайзійський WQI, базуються переважно на фізико-хімічних показниках і не містять повноцінних біологічних та біохімічних індикаторів. Натомість більш сучасні підходи, зокрема WQI Канадської ради міністрів навколишнього середовища, є гнучкими та можуть включати як фізико-хімічні, так і біологічні та біохімічні параметри залежно від наявних екологічних нормативів і цілей оцінювання.

Перспективним напрямом є використання методів машинного навчання для прогнозування індексів якості води. Алгоритми регресії, класифікації, дерев рішень, нейронні мережі та методи опорних векторів дозволяють зменшити кількість необхідних параметрів аналізу без суттєвої втрати точності. Це сприяє зниженню витрат на моніторинг і розширенню систем екологічного контролю водних ресурсів, а також підтримує реалізацію принципів сталого розвитку шляхом раціонального використання природних ресурсів, підвищення ефективності управління водними екосистемами та зменшення антропогенного навантаження.

Отже, поєднання традиційних моделей індексів якості води із сучасними методами машинного навчання є перспективним підходом для підвищення ефективності оцінювання та прогнозування якості води в умовах зростаючого антропогенного навантаження на водні екосистеми та необхідності забезпечення їх сталого розвитку.

Список використаних джерел

1. Abba S. I., Pham Q. B., Saini G., Linh N. T. T., Ahmed A. N., Mohajane M., Khaledian M., Abdulkadir R. A., Bach Q.-V. Implementation of data intelligence models coupled with ensemble machine learning for prediction of water quality index. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27, No. 33. P. 41524–41539. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09689-x>
2. Abbasi T., Abbasi S. A. Chapter 1 – Why Water-Quality Indices. In: *Water Quality Indices*. Amsterdam: Elsevier, 2012. P. 3–7. ISBN 978-0-444-54304-2.
3. Abbasi T., Abbasi S. A. Water-Quality Indices. In: *Water Quality Indices*. Amsterdam: Elsevier, 2012. P. 353–356. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-54304-2.00016-6>
4. Abrahão R., Carvalho M., Da Silva W. R. Jr., Machado T. T. V., Gadelha C. L. M., Hernandez M. I. M. Use of index analysis to evaluate the water quality of a stream receiving industrial effluents. *Water SA*. 2007. Vol. 33, No. 4. P. 459–466. <https://doi.org/10.4314/wsa.v33i4.52940>
5. Asadollah S. B. H. S., Sharafati A., Motta D., Yaseen Z. M. River water quality index prediction and uncertainty analysis: A comparative study of machine learning models. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Vol. 9, No. 1. Article 104599. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104599>
6. Banerjee T., Srivastava R. K. Application of water quality index for assessment of surface water quality surrounding integrated industrial estate-Pantnagar. *Water Science and Technology*. 2009. Vol. 60, No. 8. P. 2041–2053. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.537>
7. Behmel S., Damour M., Ludwig R., Rodriguez M. J. Water quality monitoring strategies – A review and future perspectives. *Science of the Total Environment*. 2016. Vol. 571. P. 1312–1329. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.235>
8. Bhatti N. B., Siyal A. A., Qureshi A. L., Bhatti I. A. Socio-economic impact assessment of small dams based on T-paired sample test using SPSS software. *Civil Engineering Journal*. 2019. Vol. 5, No. 1. P. 153–164. <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091233>
9. Bordalo A. A., Teixeira R., Wiebe W. J. A water quality index applied to an international shared river basin: The case of the Douro River. *Environmental Management*. 2006. Vol. 38. P. 910–920. <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0037-6>
10. Braiek H. B., Khomh F. On testing machine learning programs. *Journal of Systems and Software*. 2020. Vol. 164. Article 110542. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2020.110542>
11. Brack W., Dulio V., Ågerstrand M., Allan I., Altenburger R., Brinkmann M., Bunke D., Burgess R. M., Cousins I., Escher B. I. et al. Towards the review of the European Union Water Framework Directive: Recommendations for more efficient assessment and management of chemical contamination in European surface water resources. *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 576. P. 720–737. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.104>
12. Carvalho L., Cortes R., Bordalo A. A. Evaluation of the ecological status of an impaired watershed by using a multi-index approach. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2011. Vol. 174. P. 493–508. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1473-9>
13. Casillas-García L. F., de Anda J., Yebra-Montes C., Shear H., Díaz-Vázquez D., Gradilla-Hernández M. S. Development of a specific water quality index for the protection of aquatic life of a highly polluted urban river. *Ecological Indicators*. 2021. Vol. 129. Article 107899. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107899>
14. Cordier C., Guyomard K., Stavrakakis C., Sauvade P., Coelho F., Moulin P. Culture of microalgae with ultrafiltered seawater: A feasibility study. *SciMedicine Journal*. 2020. Vol. 2, No. 2. P. 56–62. <https://doi.org/10.28991/SciMedJ-2020-0202-2>
15. Dadolahi-Sohrab A., Arjomand F., Fadaei-Nasab M. Water quality index as a simple indicator of watersheds pollution in southwestern part of Iran. *Water and Environment Journal*. 2012. Vol. 26, No. 4. P. 445–454. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2011.00303.x>

16. Das Gupta A. Implication of environmental flows in river basin management. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2008. Vol. 33, No. 5. P. 298–303. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.02.004>
17. Debels P., Figueroa R., Urrutia R., Barra R., Niell X. Evaluation of water quality in the Chillán River (Central Chile) using physicochemical parameters and a modified water quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2005. Vol. 110. P. 301–322. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-8064-1>
18. De Figueiredo H. P., de Figueiredo C. R. P., de Souza Barros J. H., Constantino M., Magalhães Filho F. J. C., de Moraes P. M., da Costa R. B. Water quality in an urban environmental protection area in the Cerrado Biome, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2019. Vol. 191, No. 2. Article 117. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7194-9>
19. Dezfooli D., Hosseini-Moghari S.-M., Ebrahimi K., Araghinejad S. Classification of water quality status based on minimum quality parameters: Application of machine learning techniques. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2018. Vol. 4. P. 311–324. <https://doi.org/10.1007/s40808-017-0406-9>
20. Estrategia integral Revivamos el Río Santiago. Gobierno de Jalisco. URL: <https://riosantiago.jalisco.gob.mx/> (дата звернення: 10.05.2026).
21. Ewaid S. H., Abed S. A. Water quality index for Al-Gharraf River, southern Iraq. *Egyptian Journal of Aquatic Research*. 2017. Vol. 43, No. 2. P. 117–122. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2017.03.001>
22. Ewaid S. H., Abed S. A., Kadhum S. A. Predicting the Tigris River water quality within Baghdad, Iraq by using water quality index and regression analysis. *Environmental Technology & Innovation*. 2018. Vol. 11. P. 390–398. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.06.013>
23. Fernández del Castillo A., Yebra-Montes C., Verduzco Garibay M., de Anda J., Garcia-Gonzalez A., Gradilla-Hernández M. S. Simple prediction of an ecosystem-specific water quality index and the water quality classification of a highly polluted river through supervised machine learning. *Water*. 2022. Vol. 14, No. 8. Article 1235. <https://doi.org/10.3390/w14081235>
24. Gazzaz N. M., Yusoff M. K., Aris A. Z., Juahir H., Ramli M. F. Artificial neural network modeling of the water quality index for Kinta River (Malaysia) using water quality variables as predictors. *Marine Pollution Bulletin*. 2012. Vol. 64, No. 11. P. 2409–2420. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.08.005>
25. Grabowski R. C., Gurnell A. M. Hydrogeomorphology–ecology interactions in river systems. *River Research and Applications*. 2016. Vol. 32, No. 2. P. 139–141. <https://doi.org/10.1002/rra.2974>
26. Gradilla-Hernández M. S., de Anda J., Garcia-Gonzalez A., Montes C. Y., Barrios-Piña H., Ruiz-Palomino P., Díaz-Vázquez D. Assessment of the water quality of a subtropical lake using the NSF-WQI and a newly proposed ecosystem specific water quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2020. Vol. 192, No. 5. Article 296. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08265-7>
27. Hameed M., Sharqi S. S., Yaseen Z. M., Afan H. A., Hussain A., Elshafie A. Application of artificial intelligence (AI) techniques in water quality index prediction: A case study in tropical region, Malaysia. *Neural Computing and Applications*. 2017. Vol. 28, Suppl. 1. P. S893–S905. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2404-7>
28. Ho J. Y., Afan H. A., El-Shafie A. H., Koting S. B., Mohd N. S., Jaafar W. Z. B., Hin L. S., Malek M. A., Ahmed A. N., Mohtar W. H. M. W. et al. Towards a time and cost effective approach to water quality index class prediction. *Journal of Hydrology*. 2019. Vol. 575. P. 148–165. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.016>
29. Jha D. K., Devi M. P., Vidyalakshmi R., Brindha B., Vinithkumar N. V., Kirubakaran R. Water quality assessment using water quality index and geographical information system methods in the coastal waters of Andaman Sea, India. *Marine Pollution Bulletin*. 2015. Vol. 100, No. 1. P. 555–561. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.08.032>
30. Kachroud M., Trolard F., Kefi M., Jebari S., Bourrié G. Water quality indices: Challenges and application limits in the literature. *Water*. 2019. Vol. 11, No. 2. Article 361. <https://doi.org/10.3390/w11020361>

31. Kannel P. R., Lee S., Lee Y.-S., Kanel S. R., Khan S. P. Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2007. Vol. 132. P. 93–110. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9505-1>
32. Khan A. A., Paterson R., Khan H. Modification and application of the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) for the communication of drinking water quality data in Newfoundland and Labrador. *Water Quality Research Journal of Canada*. 2004. Vol. 39, No. 3. P. 285–293. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2004.039>
33. Kouadri S., Elbeltagi A., Islam A. R. M. T., Kateb S. Performance of machine learning methods in predicting water quality index based on irregular data set: Application on Illizi region (Algerian southeast). *Applied Water Science*. 2021. Vol. 11. Article 190. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01528-9>
34. Lobato T. C., Hauser-Davis R. A., Oliveira T. F., Silveira A. M., Silva H. A. N., Tavares M. R. M., Saraiva A. C. F. Construction of a novel water quality index and quality indicator for reservoir water quality evaluation: A case study in the Amazon region. *Journal of Hydrology*. 2015. Vol. 522. P. 674–683. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.021>
35. Lowe L., Szemis J., Webb J. A. Uncertainty and environmental water. In: *Water for the Environment: From Policy and Science to Implementation and Management*. Elsevier, 2017. P. 317–344. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803907-6.00015-2>
36. Lumb A., Halliwell D., Sharma T. Application of CCME Water Quality Index to monitor water quality: A case study of the Mackenzie River Basin, Canada. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2006. Vol. 113. P. 411–429. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-9092-6>
37. Lumb A., Sharma T. C., Bibeault J.-F. A review of genesis and evolution of Water Quality Index (WQI) and some future directions. *Water Quality, Exposure and Health*. 2011. Vol. 3. P. 11–24. <https://doi.org/10.1007/s12403-011-0040-0>
38. Magesh N. S., Krishnakumar S., Chandrasekar N., Soundranayagam J. P. Groundwater quality assessment using WQI and GIS techniques, Dindigul district, Tamil Nadu, India. *Arabian Journal of Geosciences*. 2013. Vol. 6. P. 4179–4189. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0673-8>
39. Mohebbi M. R., Saeedi R., Montazeri A., Azam Vaghefi K., Labbafi S., Okaie S., Abtahi M., Mohagheghian A. Assessment of water quality in groundwater resources of Iran using a modified Drinking Water Quality Index (DWQI). *Ecological Indicators*. 2013. Vol. 30. P. 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.02.008>
40. Naubi I., Zardari N. H., Shirazi S. M., Ibrahim N. F. B., Baloo L. Effectiveness of Water Quality Index for monitoring Malaysian river water quality. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2016. Vol. 25, No. 1. P. 231–239. <https://doi.org/10.15244/pjoes/60109>
41. Nong X., Shao D., Zhong H., Liang J. Evaluation of water quality in the South-to-North Water Diversion Project of China using the water quality index (WQI) method. *Water Research*. 2020. Vol. 178. Article 115781. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115781>
42. Ortega D. J. P., Pérez D. A., Américo J. H. P., De Carvalho S. L., Segovia J. A. Development of index of resilience for surface water in watersheds. *Journal of Urban and Environmental Engineering*. 2016. Vol. 10, No. 1. P. 72–82. <https://doi.org/10.4090/juee.2016.v10n1.007282>
43. Ouyang Y. Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis. *Water Research*. 2005. Vol. 39, No. 12. P. 2621–2635. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.04.024>
44. Pandhiani S. M., Sihag P., Shabri A. B., Singh B., Pham Q. B. Time-series prediction of streamflows of Malaysian rivers using data-driven techniques. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2020. Vol. 146, No. 7. Article 04020013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001463](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001463)
45. Pesce S. F., Wunderlin D. A. Use of water quality indices to verify the impact of Cordoba City (Argentina) on Suquia River. *Water Research*. 2000. Vol. 34, No. 11. P. 2915–2926. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00036-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00036-1)
46. Rangeti I., Dzwauro B., Barratt G. J., Otieno F. A. O. Ecosystem-specific water quality indices. *African Journal of Aquatic Science*. 2015. Vol. 40, No. 3. P. 227–234. <https://doi.org/10.2989/16085914.2015.1054341>

47. Sánchez E., Colmenarejo M. F., Vicente J., Rubio A., García M. G., Travieso L., Borja R. Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution. *Ecological Indicators*. 2007. Vol. 7, No. 2. P. 315–328. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2006.02.005>
48. Shakhman I., Bystrantseva A. Water quality assessment of the surface water of the Southern Bug River Basin by complex indices. *Journal of Ecological Engineering*. 2021. Vol. 22, No. 1. P. 195–205. <https://doi.org/10.12911/22998993/128858>
49. Singh B., Sihag P., Deswal S. Modelling of the impact of water quality on the infiltration rate of the soil. *Applied Water Science*. 2019. Vol. 9. Article 15. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0892-1>
50. Sun W., Xia C., Xu M., Guo J., Sun G. Application of modified water quality indices as indicators to assess the spatial and temporal trends of water quality in the Dongjiang River. *Ecological Indicators*. 2016. Vol. 66. P. 306–312. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.054>
51. Sutadian A. D., Muttill N., Yilmaz A. G., Perera B. J. C. Development of river water quality indices — A review. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2016. Vol. 188. Article 58. P. 1–29. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5050-0>
52. Talalaj I. A. Adaptation of water quality index (WQI) for groundwater quality assessment near the landfill site. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2014. Vol. 36, No. 3. P. 144–151. <https://doi.org/10.3103/S1063455X14030084>
53. Tiyasha, Tung T. M., Yaseen Z. M. A survey on river water quality modelling using artificial intelligence models: 2000–2020. *Journal of Hydrology*. 2020. Vol. 585. Article 124670. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124670>
54. Tyagi S., Sharma B., Singh P., Dobhal R. Water quality assessment in terms of Water Quality Index. *American Journal of Water Resources*. 2013. Vol. 1, No. 3. P. 34–38. <https://doi.org/10.12691/ajwr-1-3-3>
55. Uddin M. G., Moniruzzaman M., Khan M. Evaluation of groundwater quality using CCME Water Quality Index in the Rooppur Nuclear Power Plant Area, Ishwardi, Pabna, Bangladesh. *American Journal of Environmental Protection*. 2017. Vol. 5, No. 2. P. 33–43. <https://doi.org/10.12691/env-5-2-2>
56. Uddin M. G., Moniruzzaman M., Quader M. A., Hasan M. A. Spatial variability in the distribution of trace metals in groundwater around the Rooppur nuclear power plant in Ishwardi, Bangladesh. *Groundwater for Sustainable Development*. 2018. Vol. 7. P. 220–231. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.06.002>
57. Yan F., Liu L., Li Y., Zhang Y., Chen M., Xing X. A dynamic water quality index model based on functional data analysis. *Ecological Indicators*. 2015. Vol. 57. P. 249–258. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.05.005>

References

1. Abba, S. I., Pham, Q. B., Saini, G., Linh, N. T. T., Ahmed, A. N., Mohajane, M., Khaledian, M., Abdulkadir, R. A., & Bach, Q.-V. (2020). Implementation of data intelligence models coupled with ensemble machine learning for prediction of water quality index. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33), 41524–41539. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09689-x> [in English].
2. Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2012). Chapter 1—Why water-quality indices. In *Water Quality Indices* (pp. 3–7). Amsterdam: Elsevier. [in English].
3. Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2012). Water-quality indices. In *Water Quality Indices* (pp. 353–356). Amsterdam: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-54304-2.00016-6> [in English].
4. Abrahão, R., Carvalho, M., Da Silva, W. R., Jr., Machado, T. T. V., Gadelha, C. L. M., & Hernandez, M. I. M. (2007). Use of index analysis to evaluate the water quality of a stream receiving industrial effluents. *Water SA*, 33(4), 459–466. <https://doi.org/10.4314/wsa.v33i4.52940> [in English].
5. Asadollah, S. B. H. S., Sharafati, A., Motta, D., & Yaseen, Z. M. (2021). River water quality index prediction and uncertainty analysis: A comparative study of machine learning

- models. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), Article 104599. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104599> [in English].
6. Banerjee, T., & Srivastava, R. K. (2009). Application of water quality index for assessment of surface water quality surrounding integrated industrial estate-Pantnagar. *Water Science and Technology*, 60(8), 2041–2053. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.537> [in English].
7. Behmel, S., Damour, M., Ludwig, R., & Rodriguez, M. J. (2016). Water quality monitoring strategies—A review and future perspectives. *Science of the Total Environment*, 571, 1312–1329. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.235> [in English].
8. Bhatti, N. B., Siyal, A. A., Qureshi, A. L., & Bhatti, I. A. (2019). Socio-economic impact assessment of small dams based on T-paired sample test using SPSS software. *Civil Engineering Journal*, 5(1), 153–164. <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091233> [in English].
9. Bordalo, A. A., Teixeira, R., & Wiebe, W. J. (2006). A water quality index applied to an international shared river basin: The case of the Douro River. *Environmental Management*, 38, 910–920. <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0037-6> [in English].
10. Braiek, H. B., & Khomh, F. (2020). On testing machine learning programs. *Journal of Systems and Software*, 164, Article 110542. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2020.110542> [in English].
11. Brack, W., Dulio, V., Ågerstrand, M., Allan, I., Altenburger, R., Brinkmann, M., Bunke, D., Burgess, R. M., Cousins, I., Escher, B. I., et al. (2017). Towards the review of the European Union Water Framework Directive: Recommendations for more efficient assessment and management of chemical contamination in European surface water resources. *Science of the Total Environment*, 576, 720–737. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.104> [in English].
12. Carvalho, L., Cortes, R., & Bordalo, A. A. (2011). Evaluation of the ecological status of an impaired watershed by using a multi-index approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 174, 493–508. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1473-9> [in English].
13. Casillas-García, L. F., de Anda, J., Yebra-Montes, C., Shear, H., Díaz-Vázquez, D., & Gradilla-Hernández, M. S. (2021). Development of a specific water quality index for the protection of aquatic life of a highly polluted urban river. *Ecological Indicators*, 129, Article 107899. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107899> [in English].
14. Cordier, C., Guyomard, K., Stavrakakis, C., Sauvade, P., Coelho, F., & Moulin, P. (2020). Culture of microalgae with ultrafiltered seawater: A feasibility study. *SciMedicine Journal*, 2(2), 56–62. <https://doi.org/10.28991/SciMedJ-2020-0202-2> [in English].
15. Dadolahi-Sohrab, A., Arjomand, F., & Fadaei-Nasab, M. (2012). Water quality index as a simple indicator of watersheds pollution in southwestern part of Iran. *Water and Environment Journal*, 26(4), 445–454. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2011.00303.x> [in English].
16. Das Gupta, A. (2008). Implication of environmental flows in river basin management. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33(5), 298–303. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.02.004> [in English].
17. Debels, P., Figueroa, R., Urrutia, R., Barra, R., & Niell, X. (2005). Evaluation of water quality in the Chillán River (Central Chile) using physicochemical parameters and a modified water quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 110, 301–322. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-8064-1> [in English].
18. De Figueiredo, H. P., de Figueiredo, C. R. P., de Souza Barros, J. H., Constantino, M., Magalhães Filho, F. J. C., de Moraes, P. M., & da Costa, R. B. (2019). Water quality in an urban environmental protection area in the Cerrado Biome, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(2), Article 117. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7194-9> [in English].
19. Dezfooli, D., Hosseini-Moghari, S.-M., Ebrahimi, K., & Araghinejad, S. (2018). Classification of water quality status based on minimum quality parameters: Application of machine learning techniques. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4, 311–324. <https://doi.org/10.1007/s40808-017-0406-9> [in English].
20. Gobierno de Jalisco. (n.d.). *Estrategia integral Revivamos el Río Santiago* [Comprehensive strategy Let's revive the Santiago River]. Retrieved May 10, 2026, from <https://riosantiago.jalisco.gob.mx/> [in Spanish].
21. Ewaid, S. H., & Abed, S. A. (2017). Water quality index for Al-Gharraf River, southern Iraq. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 43(2), 117–122. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2017.03.001> [in English].

22. Ewaid, S. H., Abed, S. A., & Kadhum, S. A. (2018). Predicting the Tigris River water quality within Baghdad, Iraq by using water quality index and regression analysis. *Environmental Technology & Innovation*, 11, 390–398. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.06.013> [in English].
23. Fernández del Castillo, A., Yebra-Montes, C., Verduzco Garibay, M., de Anda, J., Garcia-Gonzalez, A., & Gradilla-Hernández, M. S. (2022). Simple prediction of an ecosystem-specific water quality index and the water quality classification of a highly polluted river through supervised machine learning. *Water*, 14(8), Article 1235. <https://doi.org/10.3390/w14081235> [in English].
24. Gazzaz, N. M., Yusoff, M. K., Aris, A. Z., Juahir, H., & Ramli, M. F. (2012). Artificial neural network modeling of the water quality index for Kinta River (Malaysia) using water quality variables as predictors. *Marine Pollution Bulletin*, 64(11), 2409–2420. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.08.005> [in English].
25. Grabowski, R. C., & Gurnell, A. M. (2016). Hydrogeomorphology–ecology interactions in river systems. *River Research and Applications*, 32(2), 139–141. <https://doi.org/10.1002/rra.2974> [in English].
26. Gradilla-Hernández, M. S., de Anda, J., Garcia-Gonzalez, A., Montes, C. Y., Barrios-Piña, H., Ruiz-Palomino, P., & Díaz-Vázquez, D. (2020). Assessment of the water quality of a subtropical lake using the NSF-WQI and a newly proposed ecosystem specific water quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(5), Article 296. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08265-7> [in English].
27. Hameed, M., Sharqi, S. S., Yaseen, Z. M., Afan, H. A., Hussain, A., & Elshafie, A. (2017). Application of artificial intelligence (AI) techniques in water quality index prediction: A case study in tropical region, Malaysia. *Neural Computing and Applications*, 28(Suppl. 1), S893–S905. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2404-7> [in English].
28. Ho, J. Y., Afan, H. A., El-Shafie, A. H., Koting, S. B., Mohd, N. S., Jaafar, W. Z. B., Hin, L. S., Malek, M. A., Ahmed, A. N., Mohtar, W. H. M. W., et al. (2019). Towards a time and cost effective approach to water quality index class prediction. *Journal of Hydrology*, 575, 148–165. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.016> [in English].
29. Jha, D. K., Devi, M. P., Vidyalakshmi, R., Brindha, B., Vinithkumar, N. V., & Kirubakaran, R. (2015). Water quality assessment using water quality index and geographical information system methods in the coastal waters of Andaman Sea, India. *Marine Pollution Bulletin*, 100(1), 555–561. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.08.032> [in English].
30. Kachroud, M., Trolard, F., Kefi, M., Jebari, S., & Bourrié, G. (2019). Water quality indices: Challenges and application limits in the literature. *Water*, 11(2), Article 361. <https://doi.org/10.3390/w11020361> [in English].
31. Kannel, P. R., Lee, S., Lee, Y.-S., Kanel, S. R., & Khan, S. P. (2007). Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 132, 93–110. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9505-1> [in English].
32. Khan, A. A., Paterson, R., & Khan, H. (2004). Modification and application of the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) for the communication of drinking water quality data in Newfoundland and Labrador. *Water Quality Research Journal of Canada*, 39(3), 285–293. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2004.039> [in English].
33. Kouadri, S., Elbeltagi, A., Islam, A. R. M. T., & Kateb, S. (2021). Performance of machine learning methods in predicting water quality index based on irregular data set: Application on Illizi region (Algerian southeast). *Applied Water Science*, 11, Article 190. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01528-9> [in English].
34. Lobato, T. C., Hauser-Davis, R. A., Oliveira, T. F., Silveira, A. M., Silva, H. A. N., Tavares, M. R. M., & Saraiva, A. C. F. (2015). Construction of a novel water quality index and quality indicator for reservoir water quality evaluation: A case study in the Amazon region. *Journal of Hydrology*, 522, 674–683. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.021> [in English].
35. Lowe, L., Szemis, J., & Webb, J. A. (2017). Uncertainty and environmental water. In *Water for the Environment: From Policy and Science to Implementation and Management* (pp. 317–344). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803907-6.00015-2> [in English].

36. Lumb, A., Halliwell, D., & Sharma, T. (2006). Application of CCME Water Quality Index to monitor water quality: A case study of the Mackenzie River Basin, Canada. *Environmental Monitoring and Assessment*, 113, 411–429. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-9092-6> [in English].
37. Lumb, A., Sharma, T. C., & Bibeault, J.-F. (2011). A review of genesis and evolution of Water Quality Index (WQI) and some future directions. *Water Quality, Exposure and Health*, 3, 11–24. <https://doi.org/10.1007/s12403-011-0040-0> [in English].
38. Magesh, N. S., Krishnakumar, S., Chandrasekar, N., & Soundranayagam, J. P. (2013). Groundwater quality assessment using WQI and GIS techniques, Dindigul district, Tamil Nadu, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 4179–4189. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0673-8> [in English].
39. Mohebbi, M. R., Saeedi, R., Montazeri, A., Azam Vaghefi, K., Labbafi, S., Oktaie, S., Abtahi, M., & Mohagheghian, A. (2013). Assessment of water quality in groundwater resources of Iran using a modified Drinking Water Quality Index (DWQI). *Ecological Indicators*, 30, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.02.008> [in English].
40. Naubi, I., Zardari, N. H., Shirazi, S. M., Ibrahim, N. F. B., & Baloo, L. (2016). Effectiveness of Water Quality Index for monitoring Malaysian river water quality. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(1), 231–239. <https://doi.org/10.15244/pjoes/60109> [in English].
41. Nong, X., Shao, D., Zhong, H., & Liang, J. (2020). Evaluation of water quality in the South-to-North Water Diversion Project of China using the water quality index (WQI) method. *Water Research*, 178, Article 115781. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115781> [in English].
42. Ortega, D. J. P., Pérez, D. A., Américo, J. H. P., De Carvalho, S. L., & Segovia, J. A. (2016). Development of index of resilience for surface water in watersheds. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 10(1), 72–82. <https://doi.org/10.4090/juee.2016.v10n1.007282> [in English].
43. Ouyang, Y. (2005). Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis. *Water Research*, 39(12), 2621–2635. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.04.024> [in English].
44. Pandhiani, S. M., Sihag, P., Shabri, A. B., Singh, B., & Pham, Q. B. (2020). Time-series prediction of streamflows of Malaysian rivers using data-driven techniques. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146(7), Article 04020013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001463](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001463) [in English].
45. Pesce, S. F., & Wunderlin, D. A. (2000). Use of water quality indices to verify the impact of Cordoba City (Argentina) on Suquia River. *Water Research*, 34(11), 2915–2926. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00036-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00036-1) [in English].
46. Rangeti, I., Dzwauro, B., Barratt, G. J., & Otieno, F. A. O. (2015). Ecosystem-specific water quality indices. *African Journal of Aquatic Science*, 40(3), 227–234. <https://doi.org/10.2989/16085914.2015.1054341> [in English].
47. Sánchez, E., Colmenarejo, M. F., Vicente, J., Rubio, A., García, M. G., Travieso, L., & Borja, R. (2007). Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution. *Ecological Indicators*, 7(2), 315–328. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2006.02.005> [in English].
48. Shakhman, I., & Bystrantseva, A. (2021). Water quality assessment of the surface water of the Southern Bug River Basin by complex indices. *Journal of Ecological Engineering*, 22(1), 195–205. <https://doi.org/10.12911/22998993/128858> [in English].
49. Singh, B., Sihag, P., & Deswal, S. (2019). Modelling of the impact of water quality on the infiltration rate of the soil. *Applied Water Science*, 9, Article 15. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0892-1> [in English].
50. Sun, W., Xia, C., Xu, M., Guo, J., & Sun, G. (2016). Application of modified water quality indices as indicators to assess the spatial and temporal trends of water quality in the Dongjiang River. *Ecological Indicators*, 66, 306–312. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.054> [in English].
51. Sutadian, A. D., Muttill, N., Yilmaz, A. G., & Perera, B. J. C. (2016). Development of river water quality indices—A review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, Article 58. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5050-0> [in English].

52. Talalaj, I. A. (2014). Adaptation of water quality index (WQI) for groundwater quality assessment near the landfill site. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 36(3), 144–151. <https://doi.org/10.3103/S1063455X14030084> [in English].

53. Tiyasha, Tung, T. M., & Yaseen, Z. M. (2020). A survey on river water quality modelling using artificial intelligence models: 2000–2020. *Journal of Hydrology*, 585, Article 124670. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124670> [in English].

54. Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P., & Dobhal, R. (2013). Water quality assessment in terms of Water Quality Index. *American Journal of Water Resources*, 1(3), 34–38. <https://doi.org/10.12691/ajwr-1-3-3> [in English].

55. Uddin, M. G., Moniruzzaman, M., & Khan, M. (2017). Evaluation of groundwater quality using CCME Water Quality Index in the Rooppur Nuclear Power Plant Area, Ishwardi, Pabna, Bangladesh. *American Journal of Environmental Protection*, 5(2), 33–43. <https://doi.org/10.12691/env-5-2-2> [in English].

56. Uddin, M. G., Moniruzzaman, M., Quader, M. A., & Hasan, M. A. (2018). Spatial variability in the distribution of trace metals in groundwater around the Rooppur nuclear power plant in Ishwardi, Bangladesh. *Groundwater for Sustainable Development*, 7, 220–231. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.06.002> [in English].

57. Yan, F., Liu, L., Li, Y., Zhang, Y., Chen, M., & Xing, X. (2015). A dynamic water quality index model based on functional data analysis. *Ecological Indicators*, 57, 249–258. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.05.005> [in English].

Humeniuk H.

PhD, Docent of Department of General Biology
and Methods of Teaching Natural Sciences,
Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University
gumenjuk@chem-bio.com.ua
orcid.org/0000-0002-7423-9968

Dukh R.

PhD student of Department of General Biology and
Methods of Teaching Natural Sciences
Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University
romaedge@ukr.net
orcid.org/0009-0001-0567-1896

WATER QUALITY INDICES BASED ON PHYSICOCHEMICAL, BIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL INDICATORS IN THE SYSTEM OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

The current state of aquatic ecosystems is characterized by increasing anthropogenic pressure, which leads to the deterioration of surface and groundwater quality due to industrial, agricultural, and urban impacts. The main factors contributing to water resource degradation include the input of biogenic elements, heavy metals, organic pollutants, as well as changes in hydrological regimes and climate variability. Under these conditions, the development and improvement of integrated approaches for assessing the condition of water bodies becomes particularly important in the context of sustainable development and the rational use of water resources.

This study considers the assessment of water quality indices (WQI) based on physicochemical, biological and biochemical parameters, which serve as the foundation for monitoring surface and groundwater under various natural and geographical conditions. A comparative analysis of seven widely used water quality models was conducted. It was shown that traditional index-based models provide a generalized and

convenient assessment of water quality; however, their accuracy depends on local hydrochemical conditions and the composition of biological and biochemical indicators.

The potential application of machine learning methods for improving the accuracy of water quality assessment and classification based on reduced sets of physicochemical, biological and biochemical parameters is also discussed. It was found that machine learning algorithms enhance the efficiency of environmental monitoring, reduce laboratory analysis costs, and enable rapid assessment of the condition of water bodies.

It was established that the integration of classical index models with modern machine learning methods improves environmental monitoring efficiency and serves as an important tool for implementing sustainable development principles in water resource management, as it promotes their rational use and protection.

The obtained results confirm the prospects of developing combined approaches to improve water resource management and protection systems under increasing anthropogenic pressure and climate change.

Keywords: water quality; water quality index; WQI; water resources monitoring; machine learning; surface water; environmental monitoring; aquatic ecosystems, sustainable development, biological and biochemical indicators.

*Стаття до редакції надійшла 01.04.2026 року
Рецензія на статтю надійшла 20.04.2026 року*