

Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety»

RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

ОЦІНКА БЕЗПЕКИ ПІДЗЕМНИХ ВОД ЗА ДОПОМОГОЮ БАГАТОМОДЕЛЬНОГО ІНДЕКСУ ЯКОСТІ ВОДИ ТА ПОКАЗНИКІВ РИЗИКУ ДЛЯ ЗДОРОВ'Я

В. Л. Безсонний¹, Р. В. Пономаренко², Л. Д. Пляцук³, О. В. Третяков⁴¹Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, Харків, Україна²Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна³Сумський державний університет, Суми, Україна⁴Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна

УДК 556.3:504.064:614.7

DOI: 10.52363/2522-1892.2025.1.5

Отримано: 15 березня 2025

Прийнято: 24 квітня 2025

Cite as: Bezsonnyi V., Ponomarenko R., Plyatsuk L., Tretyakov O. (2025). Assessment of groundwater safety using a multi-model water quality index and health risk indicators. Technogenic and ecological safety, 17(1/2025), 48–53. doi: 10.52363/2522-1892.2025.1.5

Анотація

У статті розглянуто підхід до оцінки якості підземних вод, що базується на багатомодельному аналізі індексу якості води (Water Quality Index, WQI) із застосуванням різних методів зважування показників: експертного (ISWM), ентропійного (EWM) та ризик-орієнтованого (HRWM). Метою дослідження є визначення найбільш чутливого та об'єктивного методу зважування для оцінки підземних вод із урахуванням токсикологічних характеристик забруднювачів і ризику для здоров'я людини.

Методологія ґрунтується на нормалізації гідрохімічних показників, розрахунку WQI для шести свердловин Ізюмського району (Харківська область) та обчислення ризиків згідно з методикою USEPA. У HRWM використано референтні дози (RfD) і канцерогенні коефіцієнти (CIC) для визначення ваги кожного забруднювача у загальній оцінці.

Результати дослідження показали, що HRWM є найбільш чутливим до токсичних компонентів (NO_2^- , Fe, Mn), виявляє ризик навіть за концентрацій нижчих за гранично допустимі, та краще виділяє пріоритетні джерела загрози. Метод дозволив виявити свердловини з найвищим індексом ризику, які потребують першочергового контролю.

До обмежень дослідження слід віднести обмежену кількість проаналізованих свердловин, а також використання лише доступних параметрів із токсикологічною класифікацією, що може зменшити повноту оцінки для деяких регіонів.

Практична цінність полягає у можливості адаптації HRWM для реального екологічного моніторингу підземних вод у регіонах з обмеженими ресурсами. Метод може бути інтегрований у системи управління якістю питного водопостачання та природоохоронного планування.

Наукова новизна роботи полягає в поєднанні трьох моделей зважування в єдиному дослідженні, а також у кількісному порівнянні їх ефективності з точки зору виявлення екологічно та медично значущих ризиків. Запропоновано підхід, що дозволяє краще інтегрувати медико-біологічні критерії у класичні моделі оцінювання якості води.

Ключові слова: підземні води, індекс якості води, WQI, HRWM, EWM, ISWM, токсикологічна оцінка, ризик для здоров'я, моніторинг вод, вагові коефіцієнти.

1. Постановка проблеми

Підземні води є ключовим компонентом глобального водного балансу та основним джерелом питного водопостачання для значної частини населення світу. В умовах загострення проблеми нестачі прісної води, що зумовлена як природними, так і антропогенними факторами, зростає потреба у надійних системах оцінки, моніторингу та управління якістю підземних вод. Особливу стурбованість викликає збільшення навантаження на водоносні горизонти, пов'язане з розвитком сільського господарства, промисловості, урбанізацією та зміною клімату. Це призводить до поступового зниження якості води, зростання вмісту шкідливих домішок і, відповідно, до підвищення екологічних і медико-біологічних ризиків.

Забруднення підземних вод є проблемою, що має багатоаспектний характер. З одного боку, це вплив на довкілля – погіршення стану екосистем, зміна біогеохімічних процесів та зниження самовідновлювальної здатності природних систем. З іншого боку, і це особливо важливо, забруднення води напряду впливає на здоров'я людини: споживання води, що містить підвищену кількість

нітратів, важких металів, органічних речовин чи токсичних сполук, може призводити до серйозних захворювань, включно з онкологічними, неврологічними та ендокринними порушеннями.

У зв'язку з цим однією з пріоритетних задач є розробка та впровадження методів, що дозволяють не лише виявляти наявність забруднення, а й адекватно оцінювати його потенційну небезпеку. На практиці для оцінки якості води часто використовують інтегральні підходи, зокрема індекси якості води (Water Quality Index, WQI), які агрегують численні параметри у зручну для інтерпретації форму. Проте класичні моделі індексування базуються переважно на нормативно-допустимих концентраціях речовин або суб'єктивних вагових оцінках і не враховують токсикологічну специфіку окремих забруднювачів.

На сучасному етапі розвитку водної аналітики постає нагальна потреба у більш гнучких, обґрунтованих і водночас практично орієнтованих підходах до оцінки якості підземних вод. Зокрема, виникає питання: яким чином оптимізувати методи зважування при розрахунку індексів якості води таким чином, щоб вони коректно відображали не

лише статистичні відхилення, але й рівень небезпеки кожного компонента для здоров'я людини?

Актуальність проблеми посилюється також тим, що більшість існуючих підходів до оцінки підземних вод не дозволяють робити достовірні висновки про пріоритетність забруднювачів – речовини з низькими концентраціями, але високою токсичністю можуть залишитися поза увагою. Таким чином, для формування ефективної системи моніторингу необхідне поєднання кількох підходів до оцінки – нормативного, статистичного та медико-біологічного.

Водночас, у науковій спільноті зростає зацікавленість до багатомодельного аналізу якості підземних вод, що поєднує кілька підходів до зважування: експертне (Importance Scale Weighting Model, ISWM), ентропійне (Entropy Weighting Model, EWM) та засноване на ризиках для здоров'я (Health Risk Weighting Model, HRWM). Такий комплексний підхід дозволяє не лише порівняти ефективність кожного методу, але й оцінити чутливість моделей до конкретних груп забруднювачів. Особливо важливо у цьому контексті враховувати медичну значущість певних параметрів, що може суттєво змінити структуру оцінювання й пріоритети у водній політиці.

З урахуванням вищезазначеного, науково-практична проблема полягає у формуванні підходу до оцінки якості підземних вод, який би базувався на міждисциплінарному поєднанні гідрохімії, токсикології, екології та ризик-менеджменту. Такий підхід має забезпечити не лише точну оцінку поточного стану водоносних горизонтів, а й дати змогу оперативно виявляти зони підвищеного ризику, формувати регіональні програми моніторингу та приймати обґрунтовані управлінські рішення.

З огляду на значний рівень забруднення підземних вод у низці регіонів України, зокрема в зонах із розвиненим агропромисловим комплексом, дослідження ефективності та практичної цінності багатомодельного підходу до оцінки їх якості є не лише актуальним, а й стратегічно важливим. Результати такого дослідження можуть мати прикладне значення для державних органів, які відповідають за охорону довкілля, органів місцевого самоврядування, підприємств водопостачання та профільних наукових установ.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання оцінки якості підземних вод є предметом активного наукового обговорення як у світовій, так і в українській науковій спільноті. Основний акцент сучасних досліджень зміщено з простого порівняння концентрацій забруднювачів із нормативними значеннями у бік інтегральних індексів, таких як WQI (Water Quality Index), та моделей оцінки ризику для здоров'я людини.

Класичний індекс WQI, розроблений на основі агрегування фізико-хімічних параметрів води, є загальноновизнаним інструментом оцінки [1, 2]. Його переваги полягають у зручності застосування та уніфікації підходу до різних водних об'єктів [3, 4].

Проте, як вказують дослідники, особливо [5, 6], метод зважування у структурі WQI є критичним і суттєво впливає на кінцевий результат.

Традиційний метод експертного зважування (ISWM), запропонований ще на початку 2000-х [3], піддається критиці за суб'єктивність [7]. Для мінімізації впливу людського фактора запропоновано статистичне зважування на основі інформаційної ентропії (EWM), що враховує варіативність параметрів [8, 9]. Цей підхід активно застосовується у міжнародних роботах [10, 11], а також підтримується вітчизняними дослідниками.

Зокрема, у працях В.Л. Безсонного з колегами продемонстровано потенціал EWM у вивченні якості поверхневих вод (Кременчуцьке водосховище), а також обґрунтовано вибір мінімального інформативного набору параметрів [12, 13]. Ці підходи базуються на принципі максимальної інформативності при мінімальній надмірності інформації, що є особливо актуальним для польових умов моніторингу.

Особливе місце у сучасних підходах займає Health Risk Weighting Model (HRWM), яка дозволяє враховувати токсикологічну небезпеку кожного забруднювача через такі показники, як референтна доза (RfD) та канцерогенний коефіцієнт (CIC) [14, 15]. HRWM, на відміну від ISWM та EWM, оцінює не лише екологічну, а й медико-біологічну безпеку води. Це підтверджується результатами досліджень у регіонах Індії, Пакистану, Китаю, де HRWM демонстрував вищу чутливість до пріоритетних токсикантів, особливо нітритів і важких металів [16–19].

Вітчизняні дослідники також впроваджують ризик-орієнтовані моделі. У дослідженні [20] застосовано оцінку техногенно-екологічної безпеки водотоку в умовах воєнної загрози, з урахуванням факторів ризику для здоров'я. У роботі [21] розглянуто засоби математичного прогнозування змін екологічного стану водних об'єктів, що дозволяє адаптувати методологію HRWM до динамічних сценаріїв забруднення.

Поряд з цим, актуальною залишається проблема вибору індикативних показників, найбільш чутливих до змін екологічного стану. Її розглянуто в роботі [22], де пропонується метод ідентифікації «контрольних» параметрів якості води для оптимізації моніторингу.

Із системного огляду [4] та практичних досліджень [23, 24] випливає, що найбільш ефективною є комбінація кількох моделей: ISWM для загального оцінювання, EWM для математичної об'єктивізації, та HRWM для медико-біологічного аналізу. Такий багатомодельний підхід рекомендований як основа для сучасного моніторингу підземних вод.

Таким чином, сучасна наукова думка схиляється до необхідності об'єднання традиційних та ризик-орієнтованих методів для комплексної оцінки стану вод. Особливу цінність становлять дослідження, що поєднують аналітичні, інформаційні та токсикологічні методи в єдину модель екологічної безпеки водного середовища.

3. Постановка завдання та його вирішення

Зростаюча екологічна вразливість водоносних горизонтів у регіонах із високою концентрацією промислових та сільськогосподарських об'єктів вимагає вдосконалення методів оцінювання якості підземних вод. Особливої актуальності набуває проблема забезпечення не лише гідрохімічного, а й токсикологічно орієнтованого підходу до аналізу. Існуючі моделі, як-от ISWM (Importance Scale Weighting Model) і EWM (Entropy Weighting Model), демонструють певні обмеження у точності оцінки через відсутність прямого зв'язку між параметрами якості води та ризиками для здоров'я населення.

У зв'язку з цим метою даного дослідження є порівняльна оцінка якості підземних вод за трьома підходами до зважування показників у структурі WQI: експертним (ISWM), ентропійним (EWM) та з урахуванням ризику для здоров'я (HRWM – Health Risk Weighting Model). Особлива увага приділяється чутливості кожної моделі до токсикологічно значущих забруднювачів і можливості використання HRWM як основного інструменту при регіональному моніторингу водопостачання.

Об'єктом дослідження виступають підземні води шести свердловин Букінського водозбору м. Ізюм (Харківська область), які забезпечують водопостачання населенню. Дослідження охоплює період 2003–2012 рр., у межах якого було зібрано та систематизовано дані фізико-хімічного аналізу води. До розгляду включено показники, що характеризують основні забруднення: азотні сполуки (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-), метали (Mn, Cu, Fe), а також pH, жорсткість, хлориди, сульфати й окислюваність.

Наукова новизна полягає у застосуванні HRWM у поєднанні з традиційними моделями ISWM та EWM, що дозволило отримати комплексну картину якості підземних вод у досліджуваному регіоні. Отримані результати підтверджують ефективність HRWM як інструменту для виявлення пріоритетних джерел забруднення та обґрунтування необхідності заходів щодо покращення якості водопостачання.

Упровадження HRWM до практики регіонального моніторингу підземних вод є перспективним напрямом розвитку систем управління водними ресурсами, оскільки забезпечує врахування реальних ризиків для здоров'я населення на відміну від суто нормативних або статистичних підходів.

Дослідження включає три основні етапи:

- 1) Збір та аналіз даних про фізико-хімічні параметри підземних вод;
- 2) Розрахунок WQI за трьома методами зважування (ISWM, EWM, HRWM);
- 3) Порівняльний аналіз отриманих результатів та оцінка ризику для здоров'я (HRWM).

Оскільки різні параметри мають різні одиниці вимірювання, всі значення були нормалізовані за мінімаксімним методом:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)},$$

де x_{ij} – значення показника j у свердловині i ; $\min(x_j)$, $\max(x_j)$ – мінімальне та максимальне значення показника j серед усіх свердловин.

Індекс якості води (WQI) розраховувався за трьома підходами: Експертне зважування (ISWM, Importance Scale Weighting Model) базується на суб'єктивних оцінках експертів, які присвоюють вагові коефіцієнти для кожного забруднювача. Формула для розрахунку WQI:

$$WQI_i = \sum_{j=1}^n \left(w_j \cdot \frac{x_{ij}}{c_j} \right),$$

де w_j – експертний ваговий коефіцієнт; x_{ij} – концентрація забруднювача у свердловині i ; c_j – гранично допустима концентрація (ГДК).

Ентропійне зважування (EWM, Entropy Weighting Model) використовує статистичні закономірності у варіативності даних. Формула для ентропії H_j :

$$H_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij},$$

де $f_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}}$ – нормалізоване значення;

m – кількість свердловин.

Формула для вагового коефіцієнта w_j :

$$w_j = \frac{1 - H_j}{\sum (1 - H_j)}.$$

Зважування на основі ризику для здоров'я (HRWM, Health Risk Weighting Model) враховує вплив кожного забруднювача на здоров'я людини та базується на медичних показниках: референтній дозі (RfD) та канцерогенному коефіцієнті (CIC). Формула для вагового коефіцієнта w_j :

$$w_j = \frac{C + \left(\sum_m p_{ij} \right) / m}{\sum_{j=1}^n \left(C + \left(\sum_m p_{ij} \right) / m \right)},$$

де p_{ij} – внесок забруднювача у загальний ризик; $C = 0,25$ – коригувальний коефіцієнт.

Розрахунок ризику для здоров'я (HRWM) базується на методиці, розробленій USEPA (2021). Неканцерогенний ризик

$$r_{ij} = \frac{IN_{ij} \cdot 10^{-6}}{RFD_j \cdot 70},$$

де IN_{ij} – рівень надходження забруднювача до організму; RFD_j – референтна доза.

Канцерогенний ризик

$$r_{ij} = \frac{1 - \exp(-IN_{ij} \cdot CIC_j)}{70},$$

де CIC_j – канцерогенний коефіцієнт.

Загальний ризик

$$R_i = \sum_{j=1}^n r_{ij}.$$

4. Порівняльний аналіз методів.

Критерії порівняння ISWM, EWM та HRWM: відмінності у значеннях WQI для кожної свердловини; оцінка чутливості методів до небезпечних забруднювачів; виявлення свердловин із найбільшим розходженням у WQI ; очікується, що HRWM покаже найбільш критичні результати, оскільки враховує вплив кожного забруднювача на здоров'я.

Розглянемо результати оцінки якості підземних вод та ризику для здоров'я у шести свердловинах Букінського водозабору м. Ізюм за період 2003-2012 рр. Для кожної свердловини було розраховано середньорічні значення концентрацій забруднювачів (табл. 1).

Таблиця 1 – Середньорічні концентрації забруднювачів (2003-2012 рр.)

Свердловина	NH_4^+ (мг/л)	NO_2^- (мг/л)	NO_3^- (мг/л)	Mn (мг/л)	Cu (мг/л)	Fe (мг/л)	pH	Жорсткість (ммоль/л)	Хлориди (мг/л)	Окислюваність (mgO_2/l)	Сульфати (мг/л)
№ 4	0,026	0,012	5,64	0,007	0,004	0,065	7,3	3,15	30,1	1,2	120
№ 5	0,031	0,015	4,95	0,006	0,003	0,058	7,2	2,98	28,7	1,5	132
№ 61	0,045	0,021	5,82	0,011	0,004	0,178	7,4	3,50	35,3	2,1	150
№ 62	0,038	0,018	4,86	0,145	0,003	0,140	7,5	4,12	25,4	3,8	9150
№ 63	0,022	0,009	5,23	0,004	0,003	0,038	7,35	2,85	20,2	0,9	95
№ 82	0,041	0,019	4,97	0,160	0,003	0,165	7,3	3,90	27,3	4,1	9200

Таблиця 2 – Вагові коефіцієнти забруднювачів

Показник	ISWM	EWM	HRWM
NH_4^+ (Амонійний азот)	0,10	0,065	0,084
NO_2^- (Нітритний азот)	0,08	0,072	0,097
NO_3^- (Нітратний азот)	0,09	0,078	0,091
Mn (Марганець)	0,12	0,157	0,202
Cu (Мідь)	0,05	0,045	0,056
Fe (Залізо)	0,10	0,102	0,126
pH	0,06	0,040	0,038
Жорсткість	0,09	0,088	0,095
Хлориди	0,07	0,052	0,058
Окислюваність	0,09	0,125	0,146
Сульфати	0,15	0,176	0,207

Таблиця 3 – Індекс якості води (WQI) за різними методами

Свердловина	WQI (ISWM)	WQI (EWM)	WQI (HRWM)	Категорія (HRWM)
№ 4	42,6	47,2	55,2	Середня
№ 5	50,8	58,5	63,7	Середня
№ 61	65,3	72,8	81,4	Середня
№ 62	118,2	132,6	149,2	Погана
№ 63	38,9	45,1	47,8	Добра
№ 82	129,6	146,4	163,8	Дуже погана

Таблиця 4 – Загальний ризик для здоров'я (HRWM)

Свердловина	HRWM (R_i)
№ 4	0,134
№ 5	0,151
№ 61	0,232
№ 62	0,389
№ 63	0,112
№ 82	0,448

Свердловини № 82 та № 62 мають найбільше забруднення, особливо марганцем (Mn), залізом (Fe) та сульфатами (SO_4^{2-}). Свердловина № 63 має найкращі показники якості води.

Було визначено вагові коефіцієнти для кожного забруднювача за трьома методами (ISWM, EWM, HRWM). HRWM надає найбільшу вагу марганцю (Mn) та сульфатам (SO_4^{2-}), що відповідає їхньому впливу на здоров'я. ISWM має більш рівномірний розподіл, що може недооцінювати ризики.

Результати розрахунку WQI за трьома методами наведено в табл. 3. HRWM дає найбільш критичні оцінки у порівнянні з ISWM та EWM. Свердловини № 82 та № 62 мають найгіршу якість води. Свердловина № 63 є найчистішою.

Значення загального ризику для здоров'я (HRWM) представлено в табл. 4.

Висновки

Аналіз підземних вод показав значні відмінності у їх якості залежно від свердловини. За результатами дослідження, найбільше забруднення виявлено у свердловинах № 82 та № 62, тоді як свердловини № 4 та № 63 мають відносно чисту воду. Основними забруднювачами є марганець (Mn), сульфати (SO_4^{2-}) та залізо (Fe).

Використання різних методів зважування суттєво впливає на кінцеві значення WQI . Порівняння методів ISWM, EWM та HRWM показало, що HRWM дає найбільш критичні оцінки, оскільки враховує реальний токсикологічний вплив забруднювачів на здоров'я. Метод ISWM (експертне зважування) недооцінює небезпеку марганцю та сульфатів, тоді як EWM (ентропійне зважування) не враховує медичні ризики.

Свердловини № 82 та № 62 мають найвищий рівень загрози для здоров'я. Розрахунок ризику для здоров'я (HRWM, RiR_i) показав, що найбільший ризик спостерігається у свердловинах № 82 (0,448) та № 62 (0,389), що підтверджує їхню екологічну небезпеку.

Найчистішою є вода у свердловині № 63. Свердловина № 63 має найнижчі значення *WQI* та *HRWM*, що свідчить про найменшу загрозу для здоров'я населення.

HRWM є найбільш точним методом оцінки якості підземних вод. Метод *HRWM* дозволяє ідентифікувати найбільш небезпечні забруднювачі, що неможливо зробити за допомогою традиційних підходів.

Необхідно впровадити заходи з покращення якості води у свердловинах № 82 та № 62. Зокрема, рекомендується додаткове очищення від марганцю, сульфатів та заліза, оскільки їх концентрації перевищують допустимі норми.

HRWM показав найбільш достовірні результати порівняно з *ISWM* та *EWM*, тому рекомендується

впровадження цього методу для аналізу підземних вод на рівні регіонального водного моніторингу.

Для покращення екологічної ситуації у регіоні рекомендується збільшити частоту відбору проб води та контролю забруднювачів, особливо у критичних свердловинах № 82 та № 62.

Необхідно провести додаткове дослідження джерел забруднення марганцем, сульфатами та залізом, щоб визначити причини їх високої концентрації у воді та розробити заходи щодо їх зниження.

Наступні роботи можуть включати моделювання змін концентрацій забруднювачів у часі, що дозволить прогнозувати тенденції забруднення та приймати превентивні заходи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Development of river water quality indices – a review / A. D. Sutadian, N. Muttil, A. G. Yilmaz, B. J. C. Perera. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2016. Vol. 188. Art. 5050. DOI: 10.1007/s10661-015-5050-0.
2. Zhang Q., Xu P., Qian H. Groundwater quality assessment using improved water quality index (WQI) and human health risk (HHR) evaluation in a semi-arid region of Northwest China. *Exposure and Health*. 2020. Vol. 12. P. 191–216. DOI: 10.1007/s12403-020-00345-w.
3. Pesce S. F., Wunderlin D. A. Use of water quality indices to verify the impact of Córdoba City (Argentina) on Suquia River. *Water Research*. 2000. Vol. 34. P. 2915–2926. DOI: 10.1016/S0043-1354(00)00036-1.
4. Application of water quality indices for evaluating water quality and anthropogenic impact assessment / S. Tavakoly Sany et al. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2018. Vol. 16. P. 1894–1906. DOI: 10.1007/s13762-018-1894-5.
5. Feng Y., Yi F., Li C. Improved entropy weighting model in water quality evaluation. *Water Resources Management*. 2019. Vol. 33. P. 4673–4689. DOI: 10.1007/s11269-019-02227-6.
6. Assessment of water quality using entropy-weighted quality index, statistical methods and electrical resistivity tomography, Moti village, northern Pakistan / U. B. Nisar et al. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2024. Vol. 264. Art. 104368. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2024.104368.
7. Fanghui Y., Chen L., Yan F. The health risk weighting model in groundwater quality evaluation. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2018. Vol. 24(5). P. 1201–1215. DOI: 10.1080/10807039.2018.1488581.
8. Adimalla N., Wu J. Groundwater quality and associated health risks in a semi-arid region of south India: Implication to sustainable groundwater management. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2019. Vol. 25(1–2). P. 191–216. DOI: 10.1080/10807039.2018.1546550.
9. Evaluation of shallow groundwater quality at regional scales using adaptive water quality indices / P. Bretcan et al. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19. Art. 10637. DOI: 10.3390/ijerph191710637.
10. Nguyen T., Huynh N. Characterization of groundwater quality and human health risk assessment. *Civil Engineering Journal*. 2023. Vol. 9(3). P. 618–628. DOI: 10.28991/CEJ-2023-09-03-09.
11. Integrated approach for the investigation of groundwater quality through hydrochemistry and water quality index (WQI) / G. Krishan et al. *Urban Climate*. 2023. Vol. 47. Art. 101383. DOI: 10.1016/j.uclim.2022.101383.
12. Estimation of the groundwater quality index and investigation of the affecting factors their changes in Shiraz drinking groundwater, Iran / A. Badeenezhad et al. *Groundwater for Sustainable Development*. 2020. Vol. 11. Art. 100435. DOI: 10.1016/j.gsd.2020.100435.
13. Застосування принципу максимальної інформативності при мінімальній надмірності інформації для вибору оптимального числа параметрів якості води / В. Л. Безсонний, О. В. Третьяков, Л. Д. Пляцук, Р. В. Пономаренко. *Техногенно-екологічна безпека*. 2024. Т. 15, № 1. С. 46–53. DOI: 10.52363/2522-1892.2024.1.4.
14. Оцінка техногенно-екологічної безпеки водотоку за показниками ризику в умовах воєнної небезпеки / В. Л. Безсонний, Л. Д. Пляцук, Р. В. Пономаренко, О. В. Третьяков. *Техногенно-екологічна безпека*. 2022. № 2(12). С. 72–79. DOI: 10.52363/2522-1892.2022.2.9.
15. Безсонний В. Л. Вибір індикативного показника екологічного стану поверхневого джерела водопостачання. *Комунальне господарство міст*. 2022. № 3(170). С. 26–34. DOI: 10.33042/2522-1809-2022-3-170-26-34.
16. Безсонний В. Л., Пляцук Л. Д., Третьяков О. В. Засоби математичного прогнозування оцінки екологічного стану поверхневих водних об'єктів. *Екологічні науки*. 2022. № 5(44). С. 64–68. DOI: 10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44-9.
17. Визначення екологічного стану Кременчуцького водосховища на основі інформаційної ентропії / В. Л. Безсонний, Л. Д. Пляцук, Р. В. Пономаренко, О. В. Третьяков. *Техногенно-екологічна безпека*. 2023. № 1(13). С. 20–26. DOI: 10.52363/2522-1892.2023.1.3.
18. Risk assessment guidance for superfund (RAGS), Volume I: Human health evaluation manual (Part A). United States Environmental Protection Agency (USEPA), 2021. URL: <https://www.epa.gov/risk/risk-assessment-guidance-superfund-rags-part> (дата звернення 12.03.2025).
19. Drinking water quality and human health risk in Charsadda district, Pakistan / S. Khan et al. *Journal of Cleaner Production*. 2013. Vol. 60. P. 93–101. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.02.016.
20. Weber G., Kubiniok J. Spring waters as an indicator of nitrate and pesticide pollution of rural watercourses from nonpoint sources: results of repeated monitoring campaigns since the early 2000s in the low mountain landscape of Saarland, Germany. *Environmental Sciences Europe*. 2022. Vol. 34. Art. 53. DOI: 10.1186/s12302-022-00632-0.
21. Artificial neural network modeling of the river water quality – a case study / K. P. Singh, A. Basant, A. Malik, G. Jain. *Ecological Modelling*. 2009. Vol. 220. P. 888–895. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2009.01.004.

Bezsonnyi V., Ponomarenko R., Plyatsuk L., Tretyakov O.

ASSESSMENT OF GROUNDWATER SAFETY USING A MULTI-MODEL WATER QUALITY INDEX AND HEALTH RISK INDICATORS

This article presents an approach to assessing the quality of groundwater based on a multi-model analysis of the Water Quality Index (*WQI*) using various weighting methods: expert-based (*ISWM*), entropy-based (*EWM*), and health risk-oriented (*HRWM*). The aim of the study is to identify the most sensitive and objective weighting method for groundwater quality assessment, considering the toxicological characteristics of pollutants and their potential health risks.

The methodology involves the normalization of hydrochemical indicators, the calculation of *WQI* for six wells located in the Izium district (Kharkiv region, Ukraine), and the estimation of risks according to the USEPA guidelines. In the HRWM model, reference doses (RfD) and cancer slope factors (CSF) are used to determine the weight of each pollutant in the overall index.

The results indicate that the HRWM approach is the most sensitive to toxic components (such as NO_2^- , Fe, Mn), able to identify risks even at concentrations below maximum permissible levels. The method effectively highlights priority pollution sources that require immediate environmental attention and monitoring.

Limitations of the study include the relatively small number of analyzed wells and the restricted list of parameters with available toxicological data, which may affect the comprehensiveness of assessment in broader applications.

The practical value of the approach lies in the ability to adapt the HRWM method for real-world groundwater monitoring, especially in regions with limited analytical or financial resources. It can also be incorporated into decision-making systems for drinking water quality management.

The scientific novelty of this research consists in the integrated use of three *WQI* weighting models within a single study, along with a comparative evaluation of their diagnostic effectiveness in identifying medically and environmentally relevant risks. The approach enhances the incorporation of biomedical criteria into traditional water quality assessment frameworks.

Key words: groundwater, water quality index, *WQI*, HRWM, EWM, ISWM, toxicological assessment, health risk, water monitoring, weighting coefficients.

REFERENCES

1. 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(3), 5050. DOI: 10.1007/s10661-015-5050-0.
2. Zhang, Q., Xu, P., & Qian, H. (2020). Groundwater quality assessment using improved water quality index (WQI) and human health risk (HHR) evaluation in a semi-arid region of Northwest China. *Exposure and Health*, 12, 191–216. DOI: 10.1007/s12403-020-00345-w.
3. Pesce, S. F., & Wunderlin, D. A. (2000). Use of water quality indices to verify the impact of Córdoba City (Argentina) on Suquia River. *Water Research*, 34(11), 2915–2926. DOI: 10.1016/S0043-1354(00)00036-1.
4. Tavakoly Sany, S., Monazami Tehrani, G., Rezayi, M., Tajfard, M., & Borgheipour, H. (2018). Application of water quality indices for evaluating water quality and anthropogenic impact assessment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 1894–1906. DOI: 10.1007/s13762-018-1894-5.
5. Feng, Y., Yi, F., & Li, C. (2019). Improved entropy weighting model in water quality evaluation. *Water Resources Management*, 33, 4673–4689. DOI: 10.1007/s11269-019-02227-6.
6. Nisar, U. B., Rehman, W. U., Saleem, S., Taufail, K., Rehman, F. U., Farooq, M., & Ehsan, S. A. (2024). Assessment of water quality using entropy-weighted quality index, statistical methods and electrical resistivity tomography, Moti village, northern Pakistan. *Journal of Contaminant Hydrology*, 264, 104368. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2024.104368.
7. Fanghui, Y., Chen, L., & Yan, F. (2018). The health risk weighting model in groundwater quality evaluation. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 24(5), 1201–1215. DOI: 10.1080/10807039.2018.1488581.
8. Adimalla, N., & Wu, J. (2019). Groundwater quality and associated health risks in a semi-arid region of south India: Implication to sustainable groundwater management. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 25(1–2), 191–216. DOI: 10.1080/10807039.2018.1546550.
9. Bretcan, P., Tanislav, D., Radulescu, C., Șerban, G., Danielescu, S., Reid, M., & Dunea, D. (2022). Evaluation of shallow groundwater quality at regional scales using adaptive water quality indices. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 10637. DOI: 10.3390/ijerph191710637.
10. Nguyen, T., & Huynh, N. (2023). Characterization of groundwater quality and human health risk assessment. *Civil Engineering Journal*, 9(3), 618–628. DOI: 10.28991/CEJ-2023-09-03-09.
11. Krishan, G., Kumar, M., Rao, M. S., Garg, R., Yadav, B., Kansal, M., Singh, S., Bradley, A., Muste, M., & Sharma, L. (2023). Integrated approach for the investigation of groundwater quality through hydrochemistry and water quality index (WQI). *Urban Climate*, 47, 101383. DOI: 10.1016/j.uclim.2022.101383.
12. Badeenezhad, A., Tabatabaee, H., Nikbakht, H.-A., Radfard, M., Abbasnia, A., Baghapour, M., & Alhamd, M. (2020). Estimation of the groundwater quality index and investigation of the affecting factors their changes in Shiraz drinking groundwater, Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 100435. DOI: 10.1016/j.gsd.2020.100435.
13. Bezsonnyi, V. L., Tretyakov, O. V., Plyatsuk, L. D., & Ponomarenko, R. V. (2024). Zastosuvannya pryncypu maksimalnoi informatyvnosti pry minimalnii nadmirnosti informatsii dlia vyboru optymalnoho chysla parametrov yakosti vody [Application of the principle of maximum informativeness with minimum redundancy of information to determine the optimal number of water quality parameters]. *Technogenic and Ecological Safety*, 15(1), 46–53. DOI: 10.52363/2522-1892.2024.1.4. [in Ukrainian]
14. Bezsonnyi, V. L., Plyatsuk, L. D., Ponomarenko, R. V., & Tretyakov, O. V. (2022). Otsinka tekhnogenno-ekolohichnoi bezpeky vodotoku za pokaznykamy ryzyku v umovakh viyenochnoi nebezpeky [Assessment of technogenic and ecological safety of a watercourse using risk indicators under war danger]. *Technogenic and Ecological Safety*, 12(2), 72–79. DOI: 10.52363/2522-1892.2022.2.9. [in Ukrainian]
15. Bezsonnyi, V. L. (2022). Vybir indykativnoho pokaznyka ekolohichnoho stanu poverkhnevoho dzherela vodopostachannia [Selection of an indicative indicator of the ecological state of a surface water supply source]. *Municipal Economy of Cities*, 3(170), 26–34. DOI: 10.33042/2522-1809-2022-3-170-26-34. [in Ukrainian]
16. Bezsonnyi, V. L., Plyatsuk, L. D., & Tretyakov, O. V. (2022). Zasoby matematychnoho prohozuvannia otsinky ekolohichnoho stanu poverkhnevyykh vodnykh ob'ektiv [Mathematical forecasting tools for assessing the ecological state of surface water bodies]. *Ecological Sciences*, 5(44), 64–68. DOI: 10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.9. [in Ukrainian]
17. Bezsonnyi, V. L., Plyatsuk, L. D., Ponomarenko, R. V., & Tretyakov, O. V. (2023). Vyznachennia ekolohichnoho stanu Kremenchuk Reservoir based on informational entropy]. *Technogenic and Ecological Safety*, 13(1), 20–26. DOI: 10.52363/2522-1892.2023.1.3. [in Ukrainian]
18. United States Environmental Protection Agency. (2021). *Risk assessment guidance for superfund (RAGS), Volume I: Human health evaluation manual (Part A)*. URL: <https://www.epa.gov/risk/risk-assessment-guidance-superfund-rags-part>.
19. Khan, S., Shahnaz, M., Jehan, N., Rehman, S., Shah, M., & Din, I. (2013). Drinking water quality and human health risk in Charsadda district, Pakistan. *Journal of Cleaner Production*, 60, 93–101. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.02.016.
20. Weber, G., & Kubiniok, J. (2022). Spring waters as an indicator of nitrate and pesticide pollution of rural watercourses from nonpoint sources: Results of repeated monitoring campaigns since the early 2000s in the low mountain landscape of Saarland, Germany. *Environmental Sciences Europe*, 34, 53. DOI: 10.1186/s12302-022-00632-0.
21. Singh, K. P., Basant, A., Malik, A., & Jain, G. (2009). Artificial neural network modeling of the river water quality – A case study. *Ecological Modelling*, 220, 888–895. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2009.01.004.