

ЗАСТОСУВАННЯ ПРИНЦИПУ МАКСИМАЛЬНОЇ ІНФОРМАТИВНОСТІ
ПРИ МІНІМАЛЬНІЙ НАДМІРНОСТІ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ВИБОРУ
ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ВОДИВ. Л. Безсонний¹, О. В. Третьяков², Л. Д. Пляцук³, Р. В. Пономаренко⁴¹Харківський національний економічний університет ім. Семена Кузнеця, Харків, Україна²Національний авіаційний університет, Київ, Україна³Сумський державний університет, Суми, Україна⁴Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

УДК 504.06:577.4

DOI: 10.52363/2522-1892.2024.1.4

Отримано: 15 березня 2024

Прийнято: 24 квітня 2024

Cite as: Bezsonnyi V., Tretyakov O., Plyatsuk L., Ponomarenko R. (2024). Application of the principle of maximum informativeness with minimal excess of information for selecting the optimal number of water quality parameters. *Technogenic and ecological safety*, 15(1/2024), 46–53. doi: 10.52363/2522-1892.2024.1.4

Анотація

Якість поверхневих вод відіграє життєво важливу роль у визначенні стійкості екологічного середовища, здоров'я населення та соціально-економічного розвитку цілих країн. На жаль, швидке зростання світового населення разом із поточною зміною клімату в основному погіршують стан поверхневих водних об'єктів. Таким чином, використання ефективних методологій, здатних швидко та легко отримувати достовірну інформацію про якість поверхневих вод, стає фундаментальним для ефективного використання водних ресурсів та впровадження заходів і дій щодо пом'якшення наслідків. Індекси забрудненості води є одним з найбільш широко використовуваних методів для надання чіткої та повної картини стану забруднення річки, для потреб раціонально водокористування та сталого управління водними ресурсами. Вибір параметрів є одним із найважливіших і складних етапів, і наявні статистичні методи не демонструють великої об'єктивності та точності у визначенні реального стану якості води. пропонується новий підхід, заснований на теорії ентропії та відомий як принцип максимальної інформативності при мінімальній надлишковості інформації, для визначення оптимальної підмножини параметрів, що описують зміну рівня якості водного об'єкту в просторі та часі, таким чином, визначення джерел забруднення. Реалізовано алгоритм для принципу максимальної інформативності при мінімальній надлишковості інформації, який застосовано до трьох річок: Південний Буг, Дністер та Сіверський Донець.

Ключові слова: інформаційна ентропія, екологічний стан поверхневих вод, принцип максимальної інформативності при мінімальній надлишковості інформації.

1 Постановка проблеми

Вибір параметрів є одним із найважливіших та найскладніших етапів як при формування систем моніторингу, так і індексу забрудненості води. В умовах обмежених ресурсів та необхідності забезпечення високої ефективності системи моніторингу важливим стає застосування принципу максимальної інформативності при мінімальній надмірності інформації. На сьогодні існують різні індекси забрудненості води (ІЗВ), які базуються на різних обраних параметрах, починаючи від 4 [1] до 26 [2]. В останні десятиліття більшість досліджень були зосереджені на розробці ІЗВ з меншою кількістю екологічних параметрів, здатних описати загальну якість води, щоб зменшити кількість повторюваних або корельованих змінних навколишнього середовища та знизити витрати на аналіз і моніторинг. Останнім часом різні багатовимірні статистичні методи, включаючи кластерний аналіз, аналіз головних компонент, факторний аналіз і дискримінаційний аналіз широко використовуються для вибору кількох параметрів, здатних виявити коливання річкової води, якість у просторі та часі та для виявлення потенційних джерел забруднення в басейні. Незважаючи на те, що такі методи стають все більш популярними через їхню здатність керувати великими обсягами

просторових і часових даних, отриманих від різноманітних моніторингових постів, вони все ще суб'єктивні, оскільки залежать від кількості параметрів, обраних для аналізу [1, 3].

2 Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для сталого та екологічно безпечного управління водними ресурсами необхідно збирати достовірну інформацію про якість річкової води, як того вимагають Цілі сталого розвитку (ЦСР). Мережі моніторингу, що вимірюють різні хімічні, фізичні та біологічні параметри якості річок, є добрим джерелом інформації про стан води в просторі та часі [4, 5]. Однак вони не дають повної та чіткої картини сценарію, а лише судження за окремими параметрами. Для того, щоб швидко і легко збирати інформацію про якість річкової води з глобальним баченням, в останні роки були розроблені різні підходи, засновані на оцінці лише кількох індексів. Серед них метод індексу забрудненості води (ІЗВ), що широко використовується для спрощення вираження складних наборів параметрів забруднення річок, озер і підземних вод, і він вважається ключовим елементом управління водними ресурсами [6]. Зокрема, ІЗВ поєднує різні параметри навколишнього середовища та перетворює їх в унікальне значення, виявляючи

загальний стан якості води. Таким чином, замість порівняння різних результатів оцінки багатьох параметрів, метод ІЗВ є надійним підходом, здатним надати інтегровану інформацію про якість. Крім того, він допомагає особам, які приймають рішення, правильно та стабільно керувати водними ресурсами, він аналізує наслідки застосування регуляторної політики або законів і надає більш повну картину якості джерела для легшого розуміння нетехнічними зацікавленими сторонами.

Набір показників, які дозволяють систематизувати різноманітні параметри якості води, була вперше розроблена Хортоном [7]. Потім ця методологія була вдосконалена Національним фондом санітарії США, що призвело до виникнення індексу якості води [8], який показував рівень сумарного впливу обраних параметрів на загальну якість води одним числовим значенням [9–12].

Питання оцінки екологічного стану води досліджуються такими авторами, як Колеснік Д. В., Шмандій В. М., Ригас Т. С., Харламова О. В. [13], питанням використання індексів якості та удосконалення комплексної екологічної оцінки присвячені роботи Крайнюков О. М., Тімченко В. Д. [14], Аніщенко Л. Я., Полозенцева В. О., Свердлов Б. С. [15], Лобода Н. С., Смалій О. В., Заленська Є. А., Войченко Л. В. [16, 17]. За визначенням Muangthong і Shrestha [18], зростання населення, розвиток урбанізації, індустріалізація та сільськогосподарська діяльність негативно впливають на якість поверхневих вод, що зробило моніторинг та збереження цих джерел життєво важливим завданням.

Використання теорії ентропії в оцінці якості води неодноразово використовувалося протягом останнього десятиліття та було визнано більш точним серед інших методів індексування [19–21].

Ваги на основі ентропії стали продуктивним методом, що використовує інформаційну ентропію для присвоєння ваг параметрам якості води [22–24]. Інформаційна ентропія займається виявленням невизначеності або хаосу в рамках випадкового процесу. Інформаційно-ентропійний підхід використовується у різних галузях гідрології для отримання моделей дощового стоку та інфільтрації [25], а також розподілу швидкості, концентрації осаду та напруги зсуву у відкритих потоках русла [26–27]. Серед різних застосувань теорія інформації також використовувалася для оптимізації, проектування та управління декількома вимірювальними станціями, включаючи мережі якості ґрунтових вод [28], кількості опадів [29], потоку та рівня води [30]. Ці проблеми можна вирішити за допомогою підходу багатоцільової оптимізації, за якого повторювана інформація мінімізується, а загальна інформація максимізується. Ця концепція відома як максимальна інформативність при мінімальній надмірності інформації (МІМН) [31].

3 Постановка завдання та його вирішення

Мета роботи: визначити оптимальне число параметрів для оцінки якості води рік Південний Буг, Дністер та Сіверський Донець.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у застосуванні принципу максимальної інформативності при мінімальній надмірності інформації для визначення оптимального числа показників якості води різних водотоків.

Пропонується новий підхід на основі теорії інформації для вибору змінних, які спричиняють просторові та часові варіації якості річкової води, що піддається впливу точкових і дифузних джерел забруднення в межах басейну – максимальна інформативність при мінімальній надмірності інформації (МІМН) [31]. Критерій МІМН, що ґрунтується на математичному принципі, може бути більш об'єктивним і менше залежати від кількості досліджуваних змінних порівняно з іншими методами відбору, такими як кластерний аналіз, аналіз головних компонент, факторний аналіз і дискримінаційний аналіз, що характеризуються декількома недоліками: необхідністю корельованих параметрів; суворим припущенням про те, що їхній зв'язок має бути лінійним, що трапляється дуже рідко; і необхідну кількість понад 300 вимірюваних точок даних [32] для досліджуваного зразка, щоб отримати надійні результати. Натомість підхід МІМН дозволяє ідентифікувати лише параметри, які найбільше відповідають за забруднення річки. Таким чином можна було б краще розглянути та розставити пріоритети для місцевих програм моніторингу, збільшивши як частоту спостережень цих параметрів, так і кількість місць вимірювання, особливо на річкових ділянках із високим ризиком забруднення та розташованих у промислових та сільськогосподарських районах. Швидку та спрощену оцінку якості води, засновану на кількох параметрах, можна було б легше повідомити та краще зрозуміти громадськості та зацікавленим сторонам.

Основна концепція підходу МІМН полягає у виборі набору параметрів, здатного: (1) максимізувати весь інформаційний вміст (спільна інформація), (2) максимізувати всю здатність передачі інформації (трансінформація) і (3) мінімізувати надлишкову інформацію (загальна кореляція) [31].

Нехай у спостерігається N потенційних параметрів-кандидатів якості води. Для кожного параметра-кандидата існує кілька років записів, позначених $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$. Нехай S бути набором уже обраних параметрів та його елементів, представлених $X_{S1}, X_{S2}, \dots, X_{Sk}$. Подібним чином, нехай F буде набором параметрів-кандидатів для вибору, а його елементи позначаються як $X_{F1}, X_{F2}, X_{F3}, \dots, X_{Fm}$. Сума k і m є загальною кількістю, N , параметрів потенційних кандидатів.

Обсяг ефективної інформації, що S , можна моделювати в термінах спільної ентропії та трансінформації як

$$H(X_{S_1}, X_{S_2}, \dots, X_{S_k}) + \sum_{i=1}^m T(X_{S_1:S_k}; X_{F_i}), \quad (1)$$

де $X_{S_1:S_k}$ позначає об'єднаний часовий ряд $X_{S_1}, X_{S_2}, \dots, X_{S_k}$ такий, що його гранична ентропія є такою ж, як багатовимірна спільна ентропія $X_{S_1}, X_{S_2}, \dots, X_{S_k}$. Іншими словами, об'єднана змінна $X_{S_1:S_k}$ містить таку саму кількість інформації, яку зберігають усі її окремі члени $X_{S_1}, X_{S_2}, \dots, X_{S_k}$. Таке ж позначення буде використано для позначення об'єднаних змінних, наприклад, $X_{A:B}$ позначає об'єднану змінну тих змінних, нижні індекси яких A і B .

Ефективна інформація складається з двох частин. Перша частина – це спільна ентропія вибраних станцій, що вимірює загальну, але не дубльовану кількість інформації, яку можна отримати від вибраних станцій. Друга частина – це підсумовування переданої інформації з групи вже

$$Max: w_1 \left[H(X_{S_1}, X_{S_2}, \dots, X_{S_k}) + \sum_{i=1}^m T(X_{S_1:S_k}; X_{F_i}) \right] - w_2 C(X_{S_1}, X_{S_2}, \dots, X_{S_k}), \quad (4)$$

де w_1 і w_2 , сума яких дорівнює 1, є інформаційною вагою та вагою надлишковості відповідно, оскільки інколи особа, яка приймає рішення, потребує компромісу між інформативністю та надлишковістю параметрів.

На основі проведеного аналізу було ідентифіковано наступний оптимальний набір параметрів для кожної з трьох річок.

Південний Буг

Для застосування критерію максимальної інформації при мінімальній надмірності (МІМН) визначається взаємна інформація між кожним параметром та загальним станом якості води, а потім мінімізується надмірність між параметрами.

В результаті розрахунку взаємної інформації для кожного параметру відносно загального стану якості води визначено, що найбільшу інформативність мають такі параметри:

- Фосфати (Fosfat) з взаємною інформацією 1.2912;
- ХСК (НСК) з взаємною інформацією 1.2815;
- Нітрати (Nitrat) з взаємною інформацією 1.1903;
- Кисень розчинений (Kisen) з взаємною інформацією 1.1834;
- БСК₅ (BSK₅) з взаємною інформацією 1.1664;

Ці параметри надають найбільшу кількість інформації про загальний стан якості води, тому

вибраних станцій до кожної окремої станції, яка все ще знаходиться, відповідно, в наборі кандидатів.

Ще одним ключовим моментом, який слід враховувати, є надлишкова інформація серед вибраних параметрів, і її можна виміряти на основі загальної кореляції як:

$$C(X_{S_1}, X_{S_2}, \dots, X_{S_k}). \quad (2)$$

Інформативні параметри якості води повинні надавати якомога більше інформації і водночас максимально обмежувати надлишкову інформацію. Цей вид максимальної інформації та мінімальної надлишкової мережі можна визначити як:

$$\begin{cases} \max : H(X_{S_1}, X_{S_2}, \dots, X_{S_k}) + \sum_{i=1}^m T(X_{S_1:S_k}; X_{F_i}); \\ \min : C(X_{S_1}, X_{S_2}, \dots, X_{S_k}). \end{cases} \quad (3)$$

Це являє собою багатоцільову задачу оптимізації, яку можна звести до єдиної цільової задачі оптимізації, оскільки, як ефективна інформаційна частина, так і надлишкова частина мають одну і ту ж одиницю вимірювання. Таким чином, обидві цілі можна об'єднати як

вони повинні бути включені до оптимального набору для моніторингу.

На наступному кроці визначається надмірність між цими параметрами, щоб вибрати ті, які мінімізують надмірність при збереженні максимальної інформативності. Для аналізу надмірності між параметрами, які мають найвищу взаємну інформацію зі станом якості води, використовується кореляцію між цими параметрами. Кореляція ідентифікує пари параметрів, які сильно пов'язані між собою, тобто мають високу надмірність. На основі цього аналізу обираємо набір параметрів, який забезпечує максимальну інформацію при мінімальній надмірності.

Матриця кореляції (табл. 1) між обраними параметрами для набору даних показує дуже високі значення кореляції між більшістю параметрів, особливо між фосфатами (Fosfat), ХСК (НСК), нітратами (Nitrat) та БСК₅ (BSK₅). Це вказує на високу надмірність між цими параметрами, що означає, що деякі з них можуть бути виключені з аналізу без значної втрати інформації про стан якості води.

Враховуючи високу кореляцію між параметрами, для мінімізації надмірності та оптимізації набору параметрів можна розглянути можливість вибору одного або декількох параметрів із кожної групи високо корельованих параметрів для включення в кінцевий набір.

Таблиця 1 – Матриця кореляції між обраними параметрами

	Fosfat	HSK	Nitrat	Kisen	BSK₅
Fosfat	1	0,991304	0,994193	0,965201	0,997731
HSK	0,991304	1	0,99721	0,969446	0,991889
Nitrat	0,994193	0,99721	1	0,968174	0,993555
Kisen	0,965201	0,969446	0,968174	1	0,964312
BSK₅	0,997731	0,991889	0,993555	0,964312	1

На основі цих даних, для мінімізації надмірності та забезпечення комплексного охоплення різних аспектів якості води, рекомендується вибрати параметри, які не тільки мають високу взаємну інформацію зі станом якості води, але й мінімально корелюють між собою.

Враховуючи високу кореляцію між більшістю параметрів, можна запропонувати такий підхід до вибору оптимального набору:

- Фосфати (Fosfat) – через високу взаємну інформацію, цей параметр є важливим для оцінки якості води;
- Нітрати (Nitrat) – також мають високу інформативність і відрізняються від фосфатів за своїм хімічним складом та впливом на водне середовище, тому їх варто включити до набору;
- Кисень розчинений (Kisen) або БСК₅ (BSK₅) – обидва ці параметри важливі для оцінки біологічної активності та органічного забруднення води. Вибір між ними може залежати від специфіки моніторингових цілей. Якщо головна увага приділяється оцінці біохімічного споживання кисню, варто обрати БСК₅. Якщо ж більш важливою є присутність розчиненого кисню для підтримки життєдіяльності водних організмів, краще вибрати кисень розчинений.

Враховуючи високу кореляцію між фосфатами та ХСК, можливо, варто вибрати один з цих параметрів для зменшення надмірності. Однак, оскільки обидва параметри мають високу взаємну інформацію, включення обох може бути виправданим, якщо моніторингова програма націлена на детальний аналіз якості води.

Отже, оптимальний набір параметрів може включати:

- Фосфати (Fosfat);
- Нітрати (Nitrat);
- Кисень розчинений (Kisen) або БСК₅ (BSK₅), залежно від цілей моніторингу.

Цей набір параметрів забезпечить гарне покриття для оцінки якості води річки Південний Буг з мінімальною надмірністю.

Дністер

На основі розрахунків взаємної інформації для набору даних річки Дністер визначено, що найбільшу інформативність мають такі параметри:

- БСК₅ (BSK₅) з взаємною інформацією 1.2859;
- Нітрати (Nitrat) з взаємною інформацією 1.2035;
- Кисень розчинений (Kisen) з взаємною інформацією 1.1915;
- Сульфати (Sulfat) з взаємною інформацією 1.1018;
- Завислі речовини (Zavisli) з взаємною інформацією 0.9942.

Однак, висока кореляція (табл. 2) між деякими з цих параметрів вказує на можливість виключення частини з них для зменшення надмірності без значної втрати інформації. Виходячи з цього, для набору даних річки Дністер можна обрати такі параметри:

- БСК₅ (BSK₅) - цей параметр важливий для оцінки органічного забруднення води.
- Нітрати (Nitrat) - важливий параметр для оцінки забруднення води нітратами, які можуть бути небезпечними для здоров'я.
- Кисень розчинений (Kisen) або Сульфати (Sulfat) - обидва параметри важливі, але через високу кореляцію між ними можна обрати один, виходячи з специфіки моніторингових цілей. Кисень розчинений є критичним для підтримки життя водних організмів, тоді як сульфати важливі для оцінки певних типів забруднення.
- Завислі речовини (Zavisli) також мають високу інформативність, але через їхню кореляцію з іншими параметрами, вони можуть бути необов'язковими, якщо вибрано БСК₅ та Кисень розчинений або Сульфати.

Отже, оптимальний набір параметрів для набору даних річки Дністер може включати:

- БСК₅ (BSK₅);
- Нітрати (Nitrat);
- Кисень розчинений (Kisen) або Сульфати (Sulfat).

Цей набір параметрів забезпечить комплексне представлення про стан забруднення води в річці Дністер, дозволяючи оцінити як органічне забруднення, так і вміст небезпечних речовин.

Таблиця 2 – Матриця кореляції між обраними параметрами

	BSK₅	Nitrat	Kisen	Sulfat	Zavisli
BSK₅	1	0,958933	0,979636	0,986123	0,8929
Nitrat	0,958933	1	0,962667	0,967294	0,915017
Kisen	0,979636	0,962667	1	0,995757	0,907164
Sulfat	0,986123	0,967294	0,995757	1	0,912928
Zavisli	0,8929	0,915017	0,907164	0,912928	1

Сіверський Донець

В результаті розрахунку взаємної інформації для кожного параметру відносно загального стану якості води визначено, що найбільшу інформативність мають такі параметри:

- Сульфати (Sulfat) з взаємною інформацією 1.3177;
- БСК₅ (BSK₅) з взаємною інформацією 1.1538;
- Завислі речовини (Zavisli) з взаємною інформацією 1.0806;
- Хлориди (Hlorid) з взаємною інформацією 1.0406;

- Кисень розчинений (Kisen) з взаємною інформацією 1.0081.

Матриця кореляції між параметрами (табл. 3), які мають найвищу взаємну інформацію зі станом якості води, показує високі значення кореляції між більшістю параметрів. Це означає, що між цими параметрами існує значна надмірність. Для прикладу, кореляція між сульфатами (Sulfat) та хлоридами (Hlorid) становить приблизно 0.979, що вказує на дуже сильний зв'язок між цими параметрами.

Таблиця 3 – Матриця кореляції між обраними параметрами

	Sulfat	BSK₅	Zavisli	Hlorid	Kisen
Sulfat	1	0,91746	0,928626	0,97898	0,938728
BSK₅	0,91746	1	0,862495	0,906726	0,927216
Zavisli	0,928626	0,862495	1	0,892219	0,965129
Hlorid	0,97898	0,906726	0,892219	1	0,902514
Kisen	0,938728	0,927216	0,965129	0,902514	1

На основі цих даних, для мінімізації надмірності та забезпечення комплексного охоплення різних аспектів якості води, рекомендується вибрати параметри, які не тільки мають високу взаємну інформацію зі станом якості води, але й мінімально корелюють між собою.

Враховуючи високу кореляцію між більшістю параметрів, можна запропонувати такий підхід до вибору оптимального набору:

1) Сульфати (Sulfat) або Хлориди (Hlorid), але не обидва, оскільки вони мають дуже високу кореляцію;

2) БСК₅ (BSK₅) можна включити як важливий параметр, що характеризує органічне забруднення;

3) Завислі речовини (Zavisli) та Кисень розчинений (Kisen) також є важливими, але враховуючи їх високу кореляцію, можна обрати один з них.

Приймаючи до уваги, що обидва ці параметри мають високу взаємну інформацію, вибір між ними може залежати від специфічних цілей моніторингу.

Таким чином, оптимальний набір параметрів може включати, наприклад:

- Сульфати;
- БСК₅;

- Кисень розчинений або Завислі речовини, залежно від того, який з останніх двох параметрів краще відповідає цілям моніторингу.

Аналіз показав, що вибрані параметри забезпечують високий рівень інформативності про стан якості води в кожній річці з мінімальною надмірністю даних. Такий підхід дозволяє ефективно виявляти зміни в якості води та вживати відповідних заходів для її покращення.

Висновки

Підхід на основі принципу максимальної інформативності при мінімальній надмірності інформації дозволяє ідентифікувати лише параметри, які найбільше відповідають за забруднення річки. Оптимальний набір параметрів для оцінки якості води річки Південний Буг з мінімальною надмірністю включає: Фосфати, Нітрати, Кисень розчинений або БСК₅, залежно від цілей моніторингу. Для р. Дністер: БСК₅, Нітрати, Кисень розчинений або Сульфати. Для р. Сіверський Донець – Сульфати, БСК₅, і Кисень розчинений або Завислі речовини, залежно від того, який з останніх двох параметрів краще відповідає цілям моніторингу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Abbasi T., Abbasi S. A. Water Quality Indices, 1st ed.; Elsevier Science: Burlington, MA, USA, 2012.
2. Dojlido J., Raniszewski J., Woyciechowska J. Water quality index applied to rivers in the Vistula river basin in Poland. *Environmental Monitoring and Assessment*. 1994. Vol. 33. Pp. 33-42.
3. 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. 58.
4. IoT Based Real-time River Water Quality Monitoring System / M. S. U. Chowdury et al. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 155. Pp. 161-168.
5. Smart Water Quality Monitoring System Design and KPIs Analysis: Case Sites of Fiji Surface Water / K. A. Mamun et al. *Sustainability*. 2019. Vol. 11. Art. 7110.
6. Application of modified water quality indices as indicators to assess the spatial and temporal trends of water quality in the Dongjiang River / W. Sun et al. *Ecological Indicators*. 2016. Vol. 66. Pp. 306-312.
7. Water quality indices – methods for evaluating the quality of drinking water / I. Paun et al. *Incd ecoind – international symposium – simi 2016 “The environment and the industry”*, proceedings book, 2016. Pp. 395-402. DOI: 10.21698/simi.2016.0055.
8. Shwetank Suhas, Chaudhary J. K. A Comparative Study of Fuzzy Logic and WQI for Groundwater Quality Assessment. *Procedia Computer Science*. 2020. Vol. 171. Pp. 1194-1203. DOI: 10.1016/j.procs.2020.04.128.
9. Pandey R., Pattanaik L. A. Fuzzy QFD Approach to Implement Reverse Engineering in Prosthetic Socket Development. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*. 2014. Vol. 17. P. 1–14. doi:10.1504/IJISE.2014.060819
10. Інтегральна оцінка екологічного стану Дніпровського водосховища / В. Л. Безсонний та ін. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2022. № 1(35). С. 209-227. DOI: 10.52363/2524-0226-2022-35-16.
11. Моніторинг екологічної безпеки водотоків за кисневими показниками / В. Л. Безсонний та ін. *Technogenic and ecological safety*. № 10(2/2021). С. 75-83. DOI: 10.52363/2522-1892.2021.2.12.
12. Evaluation of Groundwater Quality and Heavy Metal Pollution Indices in Bazman Basin, Southeastern Iran / A. Rezaei et al. *Groundwater for Sustainable Development*. 2019. Vol. 9. Art. 100245. DOI: 10.1016/j.gsd.2019.100245.
13. Оцінка стану екологічної безпеки акваторії Кременчуцького водосховища задля збереження ландшафтно-біологічного різноманіття в умовах змін клімату / Д. В. Колесник, В. М. Шмандлій, Т. Є. Ригас, О. В. Харламова. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2021. Вип. 3(128). С. 24-29. DOI: 10.30929/1995-0519.2021.3.24-29.
14. Крайнюков О. М., Тімченко В. Д. Удосконалення комплексної оцінки екологічного стану та якості води водних об'єктів. *Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна серія «Екологія»*. 2016. Вип. 14. С. 9-14.
15. Аніщенко Л. Я., Полозенцева В. О., Свердлов Б. С. Комплексна оцінка впливів діючих водойм-накопичувачів на довкілля. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2019. Вип. 5 (118). С. 65-74. DOI: 10.30929/1995-0519.2019.5.65-74.
16. Лобода Н. С., Смалій О. В. Роль приток Донбасу у формуванні якості поверхневих вод річки Сіверський Донець. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2019. № 24. С. 64-71.
17. Заленська Є. А., Войтенко Л. В. Індекси якості води: адаптація та використання для України. *Екологічні науки : науково-практичний журнал*. 2022. № 4(43). С. 58-64.
18. Muangthong S., Shrestha S. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: case study of the Nampong River and Songkhram River, Thailand. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2015. Vol. 187. Issue 9. Art. 548.
19. Amiri V., Rezaei M., Sohrabi N. Groundwater quality assessment using entropy weighted water quality index (EWQI) in Lenjanat, Iran. *Environmental Earth Sciences*. 2014. Vol. 72. Pp. 3479-3490. DOI: 10.1007/s12665-014-3255-0.
20. Evaluation of water quality with application of Bayes' rule and entropy weight method / M. Mrunmayee et al. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2017. Vol. 21. Issue 6. 730-752. DOI: 10.1080/19648189.2016.1150895.
21. Development of irrigation water quality index incorporating information entropy / K. R. Singh, A. P. Goswami, A. S. Kalamdhad, B. Kumar. *Environment, Development and Sustainability*. 2019. Vol. 22. Pp. 3119-3132. DOI: 10.1007/s10666-019-00338-z.
22. Ентропійний підхід до оцінки екологічного стану водотоку / В. Л. Безсонний, О. В. Третьяков, Л. Д. Пляцук, А. Н. Некос. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія»*. 2022. Вип. 28. С. 6-19.
23. Визначення екологічного стану Кременчуцького водосховища на основі інформаційної ентропії / В. Л. Безсонний, Л. Д. Пляцук, Р. В. Пономаренко, О. В. Третьяков. *Technogenic and ecological safety*. № 13 (1/2023). С. 20-26. DOI: 10.52363/2522-1892.2023.1.3.
24. Безсонний В. Л., Пляцук Л. Д., Третьяков О. В. Аналіз екологічного стану Каховського водосховища на підставі ентропійного індексу. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2023. № 1 (490). С. 198-208. DOI: 10.15589/znp2023.1(490).24.
25. Singh V. P., Sivakumar B., Cui H. Tsallis Entropy Theory for Modeling in Water Engineering: A Review. *Entropy*. 2017. Vol. 19. Pp. 641.
26. Mirauda D., De Vincenzo A., Pannone M. Statistical characterization of flow field structure in evolving braided gravel beds. *Spatial Statistics*. 2019. Vol. 34. Art. 100268.
27. Sheikh Khozani Z., Wan Mohtar W. H. M. Investigation of New Tsallis-Based Equation to Predict Shear Stress Distribution in Circular and Trapezoidal Channels. *Entropy*. 2019. Vol. 21. Art. 1046.
28. Leach J. M., Coulbaly P., Guo Y. Entropy based groundwater monitoring network design considering spatial distribution of annual recharge. *Advances in Water Resources*. 2016. Vol. 96. Pp. 108-119.
29. Rainfall network optimization using radar and entropy / H. C. Yeh et al. *Entropy*. 2017. Vol. 19. Art. 553.
30. Hydrometric network design using streamflow signatures and indicators of hydrologic alteration / J. M. Leach, K.C. Kornelsen, J. Samuel, P. Coulbaly. *Journal of Hydrology*. 2015. Vol. 529. Pp. 1350-1359.
31. Li C., Singh V. P., Mishra A. K. Entropy theory-based criterion for hydrometric network evaluation and design: Maximum information minimum redundancy. *Water Resources Research*. 2012. Vol. 48. Art. W05521.
32. Using the Analytic Hierarchy Process to identify parameter weights for developing a water quality index / A. D. Sutadian, N. Muttil, A. G. Yilmaz, B. J. C. Perera. *Ecological Indicators*. 2017. Vol. 75. Pp. 220-233.

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

APPLICATION OF THE PRINCIPLE OF MAXIMUM INFORMATIVENESS WITH MINIMAL EXCESS OF INFORMATION FOR SELECTING THE OPTIMAL NUMBER OF WATER QUALITY PARAMETERS

The quality of surface water plays a vital role in determining the sustainability of the ecological environment, the health of the population, and the socio-economic development of entire countries. Unfortunately, the rapid growth of the world's population together with the current climate change mainly deteriorates the state of surface water bodies. Thus, the use of effective methodologies capable of quickly and easily obtaining reliable information about the quality of surface water becomes fundamental for the effective use of water resources and implementation of mitigation measures and actions. Water pollution indices are one of the most widely used methods for providing a clear and complete picture of the state of river pollution, for the needs of rational water use and sustainable management of water resources. The selection of parameters is one of the most important and difficult stages, and the available statistical methods do not demonstrate great objectivity and accuracy in determining the real state of water quality. A new approach, based on the theory of entropy and known as the principle of maximum informativeness with minimum redundancy of information (MIMH), is proposed for determining the optimal subset of parameters describing the change in the quality level of a water body in space and time and, thus, determining the sources of pollution. The algorithm for the MIMN principle was implemented and applied to three rivers: the Southern Bug, the Dniester, and the Siverskyi Donets.

Key words: information entropy, ecological state of surface waters, the principle of maximum informativeness with minimal information redundancy.

REFERENCES

1. Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2012). *Water Quality Indices*, 1st ed. Elsevier Science: Burlington, MA, USA.
2. Dojlido, J., Raniszewski, J., & Woyciechowska, J. (1994). Water quality index applied to rivers in the Vistula river basin in Poland. *Environmental Monitoring and Assessment*, 33, 33-42.
3. 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, 58.
4. Chowdury, M. S. U., Emran, T. B., Ghosh, S., Pathak, A., Alam, M. M., Absar, N., Andersson, K., & Hossain, M. S. (2019). IoT Based Real-time River Water Quality Monitoring System. *Procedia Computer Science*, 155, 161-168.
5. Mamun, K. A., Islam, F. R., Haque, R., Khan, M. G. M., Prasad, A. N., Haqva, H., Mudliar, R. R., & Mani, F. S. (2019). Smart Water Quality Monitoring System Design and KPIs Analysis: Case Sites of Fiji Surface Water. *Sustainability*, 11, 7110.
6. Sun, W., Xia, C. Y., Xu, M. Y., Guo, J., & Sun, G. P. (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.
7. Paun, I., Cruceru, L., Chiriac, F. L., Niculescu, M., Vasile, G., & Marin, N. (2016). Water quality indices – methods for evaluating the quality of drinking water. *Incd ecoind – international symposium – simi 2016 “The environment and the industry”, proceedings book*, 395-402. DOI: 10.21698/simi.2016.0055.
8. Shwetank, Suhas, & Chaudhary, J. K. (2020). A Comparative Study of Fuzzy Logic and WQI for Groundwater Quality Assessment. *Procedia Computer Science*, 171, 1194-1203. DOI: 10.1016/j.procs.2020.04.128.
9. Pandey, R., & Pattanaik, L. A. (2014). Fuzzy QFD Approach to Implement Reverse Engineering in Prosthetic Socket Development. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 17, 1-14. DOI: 10.1504/IJISE.2014.060819.
10. Bezsonnyi, V., Tretyakov, O., Ponomarenko, R., Borodych, P., Burmenko, O., & Karpets, K. (2021). Integral'na ocinka ekologichnogo stanu Dniprovskogo vodoshovyshha [Environmental risk assessment due to the impact of communal facilities on surface waters]. *Problems of Emergency Situations*, 2(34), 58-76. DOI: 10.52363/2524-0226-2021-34-5. [in Ukrainian]
11. Bezsonnyi, V., Tretyakov, O., Ponomarenko, R., Kalda, G., & Asotskyi, V. (2021). Monitoryng ekologichnoi' bezpeky vodotokiv za kysnevymy pokaznykamy [Monitoring of ecological safety of watercourses by means of oxygen indicators]. *Technogenic and ecological safety*, 10(2/2021), 75-83. DOI: 10.52363/2522-1892.2021.2.12. [in Ukrainian]
12. Rezaei, A., Hassani, H., Hassani, S., Jabbari, N., Fard Mousavi, S. B., & Rezaei, S. (2019). Evaluation of Groundwater Quality and Heavy Metal Pollution Indices in Bazman Basin, Southeastern Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100245. DOI: 10.1016/j.gsd.2019.100245.
13. Kolyesnik, D., Shmandiy, V., Kharlamova, O., & Rygas, T. (2021). Ocinka stanu ekologichnoi' bezpeky akvatorii' Kremenchuc'kogo vodoshovyshha zadlja zberezhenja landshaftno-biologichnogo riznomanittja v umovah zmin klimatu [Assessment of ecological safety state of the Kremenchuk reservoir aquatorium for the preservation of landscape-biological diversity in climate change conditions]. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy national university*, 3(128), 24-29. DOI: 10.30929/1995-0519.2021.3.24-29. [in Ukrainian]
14. Krainiukov, O. M., & Timchenko, V. D. (2016). Udoskonalennja kompleksnoi' ocinky ekologichnogo stanu ta jakosti vody vodnyh ob'ektiv [Environmental improvement of comprehensive assessment of water quality and water bodies]. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, 14, 9-14. [in Ukrainian]
15. Anishchenko, L., Polozentseva, V., & Sverdlov, B. (2021). Kompleksna ocinka vplyviv dijuchykh vodojm-nakopychuvachiv na dovkillja [The comprehensive evaluation environmental influence of acting accumulating reservoirs]. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy national university*, 3(128), 65-74. DOI: 10.30929/1995-0519.2019.5.65-74. [in Ukrainian]
16. Loboda, N. S. & Smalii, O. V. (2019). Rol' prytkov Donbasu u formuvanni jakosti poverhnevyyh vod richky Sivers'kyj Donec' [Role of tributaries in Donbas in ensuring the quality of the Siverskyi Donets river surface water]. *Ukrainian hydrometeorological journal*, 24, 64-71. [in Ukrainian]
17. Zalenska, Ye., & Voitenko, L. (2022). Indeksy jakosti vody: adaptacija ta vykorystannja dlja Ukraïny [Water quality indices: adaptation and application for Ukraine]. *Ecological Sciences: scientific and practical journal*, 4(43), 58-64. [in Ukrainian]
18. Muangthong, S., & Shrestha, S. (2015). Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: case study of the Nampong River and Songkhram River, Thailand. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(9), 548.
19. Amiri, V., Rezaei, M., & Sohrabi, N. (2014). Groundwater quality assessment using entropy weighted water quality index (EWQI). in Lenjanat, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 72, 3479-3490. DOI: 10.1007/s12665-014-3255-0.
20. Mrunmayee, M., Sahoo, K. C., Patra, J. B., Swain, & Khatua K. K. (2017). Evaluation of water quality with application of Bayes' rule and entropy weight method. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(6), 730-752. DOI: 10.1080/19648189.2016.1150895.
21. Singh, K. R., Goswami, A. P., Kalamdhad, A. S., & Kumar, B. (2019). Development of irrigation water quality index incorporating information entropy. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 3119-3132. DOI: 10.1007/s10668-019-00338-z.
22. Bezsonnyi, V. L., Tretyakov, O. V., Plyatsuk, L. D., & Nekos, A. N. (2022). Entropijnyj pidhid do ocinky ekologichnogo stanu vodotoku [Entropy approach to assessment of the ecological state of a water course]. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series “Ecology”*, 27, 6-19. [in Ukrainian]
23. Bezsonnyi, V., Plyatsuk, L., Ponomarenko, R., & Tretyakov, O. (2023). Vyznachenja ekologichnogo stanu Kremenchuc'kogo vodoshovyshha na osnovi informacijnoi' entropii' [Determination of the ecological state of the Kremenchuk Reservoir on the basis of information entropy]. *Technogenic and ecological safety*, 13(1/2023), 20-26. DOI: 10.52363/2522-1892.2023.1.3. [in Ukrainian]

24. Bezsonnyi, V. L., Plyatsuk, L. D., & Tretyakov, O. V. (2023). Analiz ekologichnogo stanu Kahovs'kogo vodoshovyshha na pidstavi entropijnogo indeksu [Analysis of the environmental state of the Kahav reservoir based on the entropy index]. *Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*, 1 (490), 198-208. DOI: 10.15589/znp2023.1(490).24. [in Ukrainian]
25. Singh, V. P., Sivakumar, B., & Cui, H. (2017). Tsallis Entropy Theory for Modeling in Water Engineering: A Review. *Entropy*, 19, 641.
26. Mirauda, D., De Vincenzo, A., & Pannone, M. (2019). Statistical characterization of flow field structure in evolving braided gravel beds. *Spatial Statistics*, 34, 100268.
27. Sheikh Khozani, Z., & Wan Mohtar, W. H. M. (2019). Investigation of New Tsallis-Based Equation to Predict Shear Stress Distribution in Circular and Trapezoidal Channels. *Entropy*, 21, 1046.
28. Leach, J. M., Coulibaly, P., & Guo, Y. (2016). Entropy based groundwater monitoring network design considering spatial distribution of annual recharge. *Advances in Water Resources*, 96, 108-119.
29. Yeh, H.C., Chen, Y.C., Chang, C.H., Ho, C.H., Wei, C. (2017). Rainfall network optimization using radar and entropy. *Entropy*, 19, 553.
30. Leach, J. M., Kornelsen, K. C., Samuel, J., & Coulibaly, P. (2015). Hydrometric network design using streamflow signatures and indicators of hydrologic alteration. *J. Hydrol.*, 529, 1350-1359.
31. Li, C., Singh, V. P., & Mishra, A. K. (2012). Entropy theory-based criterion for hydrometric network evaluation and design: Maximum information minimum redundancy. *Water Resources Research*, 48, W05521.
32. Sutadian, A. D., Muttill, N., Yilmaz, A. G., & Perera, B. J. C. (2017). Using the Analytic Hierarchy Process to identify parameter weights for developing a water quality index. *Ecological Indicators*, 75, 220-233.