

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ВОДОЙМИ НА ОСНОВІ ЕНТРОПІЙНО ЗВАЖЕНОГО ІНДЕКСУ ЯКОСТІ ВОДИ

Безсонний В.Л.

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця
пр. Науки, 9А, 61166, м. Харків

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
майд. Свободи, 4, 61022, м. Харків
bezsonny@gmail.com

Проведено оцінку якості водойм, що використовуються як джерело питного водопостачання містами півдня Дніпропетровської області, на основі використання вдосконаленого індексу якості води з ентропійним ваговим коефіцієнтом. В процесі розрахунку індексів якості води вага кожного параметра зазвичай або не враховується, і параметри вважаються рівнозначними, або ж надається експертами відповідно до їхнього практичного досвіду що є суб'єктивним і багато корисної та цінної інформації про якість води може втрачатися. Застосування ентропійних ваг дозволить підвищити об'єктивність індексу якості води. Розробка ентропійнозваженого індексу якості води передбачає наступні етапи: побудову вихідної матриці проб води і оцінюваних параметрів; побудову нормованої матриці, що містить нормовані значення кожного оцінюваного параметра в конкретному зразку з метою усунення похибок, викликаних різними розмірами і одиницями виміру; обчислення ентропійних ваг, щоб параметрам з нижчою ентропією або мірою безпорядку присвоювалася таким чином більша вага; агрегація ваг ентропії та шкали оцінки якості.

В результаті застосування методики оцінки екологічного стану водойми на основі ентропійно-зваженого індексу якості води ділянки р. Дніпро, що розташована на півдні Дніпропетровської області, встановлено, за значенням індексу якості у теплий та холодний періоди року відрізняється. Мінімальне значення EWQI для холодної пори 55,41 (п4), максимальне – 111,02 (п2). Мінімальне значення EWQI для теплої пори 72,76 (п4), максимальне – 104,50 (п2). Найгірша якість води характерна для пункту контролю п2 (ID27577, р. Дніпро, 219 км, с. Придніпровське, КП «Дніпро» Придніпровської с/р), при чому, значення для холодної пори року EWQI=111,02 вищі, ніж для теплої – EWQI=104,50, що вказує на те, що забруднення не обумовлено біохімічними процесами, і може пояснюватися негативним екологічним впливом Новопавлівського гранітного кар'єру. На величину ентропійно зваженого індексу якості води впливає вибір нормативного значення, тому перспективними є дослідження з обґрунтування вибору величини нормативного значення для кожних конкретних умов. *Ключові слова:* екологічний стан поверхневих вод, ентропійно зважений індекс якості води, забруднення води.

Methods of assessment of the ecological status of a water body based on the entropy-weighted index of water quality. Bezsonnyi V.

An assessment of the quality of reservoirs used as a source of drinking water supply by the cities of the south of the Dnipropetrovsk region was carried out, based on the use of an improved water quality index with an entropy weighting factor. In the process of calculating water quality indices, the weight of each parameter is usually either not taken into account, and the parameters are considered equivalent, or it is given by experts according to their practical experience, which is subjective and a lot of useful and valuable information about water quality can be lost. The use of entropy weights will increase the objectivity of the water quality index. The development of the entropy-weighted water quality index involves the following stages: construction of the initial matrix of water samples and estimated parameters; construction of a normalized matrix containing normalized values of each evaluated parameter in a specific sample in order to eliminate errors caused by different sizes and units of measurement; calculating entropy weights so that parameters with a lower entropy or degree of disorder are thus assigned a higher weight; aggregation of entropy weights and quality rating scales.

As a result of the application of the methodology for assessing the ecological state of the reservoir based on the entropy-weighted water quality index of the Dnipro River, located in the south of the Dnipropetrovsk region, it was established that the quality of the index differs in warm and cold periods of the year. The minimum value of EWQI for the cold season is 55.41 (p4), the maximum is 111.02 (p2). The minimum value of EWQI for the warm season is 72.76 (p4), the maximum is 104.50 (p2). The worst water quality is characteristic of control point p2 (ID27577, Dnipro district, 219 km, Prydniprovsk village, KP "Dnipro" Prydniprovsk village), moreover, the value for the cold season is EWQI=111.02 higher than for the warm season – EWQI=104.50, which indicates that the pollution is not due to biochemical processes and can be explained by the negative environmental impact of the Novopavlivskiy granite quarry. The value of the entropy-weighted water quality index is affected by the choice of the normative value, therefore, studies on the justification of the choice of the value of the normative value for each specific condition are promising. *Key words:* ecological state of surface waters, entropy-weighted water quality index, water pollution.

Постановка проблеми. Екологічна оцінка забруднення та визначити потенційні джерела надповерхневих водойм допомагає встановити рівень ходження цього забруднення. Водойми, що вико-

ристовуються для водопостачання, є важливою складовою сталого функціонування території, що включає в себе розвиток промисловості, сільського господарства та благополуччя населення, особливо це важливо для такого промислово навантаженого регіону як Дніпропетровська область. Оцінка поверхневих вододжерел допомагає визначити їх потенційну водопостачальну здатність та ресурси, які можуть бути використані для забезпечення питної води. Забруднення поверхневих вододжерел стає все більшою проблемою через зростання промислового та сільськогосподарського навантаження, а також надмірну експлуатацію водних ресурсів.

Актуальність дослідження. Відмінна якість води є незамінним елементом у забезпеченні сталого розвитку водних ресурсів. Це тісно пов'язано з пунктами 3 (міцне здоров'я та благополуччя), 6 (чиста вода та належні санітарні умови) та 14-го (збереження морських ресурсів) переліку Цілей сталого розвитку ООН [1]. Оцінка поверхневих вододжерел є дуже важливою для забезпечення доступу до безпечної питної води, охорони довкілля та сталого використання водних ресурсів. Поверхневі водойми є основним джерелом питної води, тому проблема оцінки екологічного стану поверхневої водойми є актуальною.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Тема дослідження відповідає основним напрямкам Концепції Загальнодержавної цільової соціальної програми «Питна вода України» на 2022–2026 роки, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 28 квітня 2021 р. № 388-р.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Комплексне оцінювання екологічного стану водойм дозволяє отримати велику кількість фізичних, хімічних і біологічних показників, багато з яких інтегровані в показники якості води (ІЯВ, англ.мовна аббревіатура – WQI) [2]. У 1965 році перший сучасний індекс якості води, розроблений Хортоном, ініціював численні дослідження в області дослідження індексів якості води [3–6]. Однак найважливішими етапами, що беруть участь в розробці таких індексів, є вибір параметрів, зважування факторів, відображаючих важливість кожного параметра і остаточна агрегація в числовий бал шляхом встановлення рейтингової шкали за кожним параметром. Останніми роками набуває поширення використання ентропійних підходів до оцінки якості води [7–9]. Ваги на основі ентропії стали корисним методом, що використовує інформаційну ентропію для присвоєння ваг параметрам якості води [10]. Інформаційна ентропія займається виявленням невизначеності або хаосу в рамках випадкового процесу. Присвоєння ваг тому чи іншому параметру в конкретному місці залежить від невизначеності його виникнення в цьому місці. Більш висока невизначеність виникнення в будь-

якому місці означає меншу вагу параметрів у цьому місці [11]. Агрегація ваг і шкали оцінки якості всіх параметрів в сукупно виведений числовий бал називається ентропійним зваженим індексом якості води (EWQI).

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. В процесі розрахунку ІЯВ вага кожного параметра зазвичай або не враховується, і параметри вважаються рівнозначними, або ж надається експертами відповідно до їхнього практичного досвіду що є суб'єктивним і багато корисної та цінної інформації про якість води може втрачатися. Застосування ентропійних ваг дозволить підвищити об'єктивність індексу якості води.

Новизна. Вперше проведено оцінку якості водойм, що використовуються як джерело питного водопостачання містами півдня Дніпропетровської області, на основі використання вдосконаленого індексу якості води з ентропійним ваговим коефіцієнтом.

Виклад основного матеріалу. У дослідженні було використано відкриті дані спостережень за екологічним станом поверхневих вод лабораторії моніторингу вод та ґрунтів Регіонального офісу водних ресурсів у Дніпропетровській області за 2020–2021 рр. Для ілюстрації запропонованої методики визначення ентропійно зваженого індексу якості води виконувалося для північної частини Каховського водосховища, у постах мережі моніторингу якості води розташованих біля наступних населених пунктів:

- п1, ID27094, р. Дніпро, 245 км, м. Марганець, питний в/з;
- п2, ID27577, р. Дніпро, 219 км, с. Придніпровське, КП «Дніпро» Придніпровської с/р;
- п3, ID27095, р. Дніпро, 228 км, м. Нікополь, питний в/з;
- п4, ID27096, р. Дніпро, 201 км, м. Покров, питний в/з;
- п5, ID27098, р. Дніпро, 196 км, с. Мар'янське, ГВС каналу Дніпро-Кривий Ріг.

Гідроecологічні системи можуть характеризуватися процесами, що збільшують, так і процесами, що знижують ентропію. Поняття ентропії є багатозначним. Поряд з ентропією Клаузіуса з'явилися статистичні, інформаційні, математичні, лінгвістичні, інтелектуальні та інші ентропії. Ентропія стала базисним поняттям теорії інформації і стала виступати мірилом невизначеності якоїсь ситуації. Для характеристики міри складності системи У. Ешбі [12] вперше запропонував використовувати поняття ентропії. В цілому, система не втрачає своєї організованості або високої впорядкованості. Щоб екологічна система могла діяти і взаємодіяти з навколишнім середовищем, вона повинна споживати інформацію з навколишнього середовища і доносити інформацію до навколишнього середовища. Цей

процес називається інформаційним метаболізмом, який спільно з речовинним та матеріальним метаболізмом утворює повний метаболізм. Вперше пов'язав поняття ентропії та інформації К. Шеннон [13]. З його подачі ентропія – це кількість інформації, що припадає на одне елементарне повідомлення джерела, яке виробляє статистично незалежні повідомлення. Отримання будь-якого обсягу інформації дорівнює втраченій ентропії.

Розробка ентропійнозваженого індексу якості води (ЕІЯВ) передбачає наступні етапи [10, 11]:

Перший крок передбачає побудову вихідної матриці проб води і оцінюваних параметрів (1).

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

де x_{ij} – концентрація i -ї речовини для j -го створу, мг/дм³.

Другий крок передбачає побудову нормованої матриці, що містить нормовані значення кожного оцінюваного параметра в конкретному зразку з метою усунення похибок, викликаних різними розмірами і одиницями виміру.

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \dots & y_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

де y_{ij} – нормоване значення i -ї речовини для j -го створу.

Нормоване значення параметру якості води знаходимо за виразом (2):

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - (x_{ij})_{\min}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} \quad (3)$$

Нормоване значення параметру якості води для розчиненого у воді кисню знаходимо за виразом (3):

$$y_{ij} = \frac{(x_{ij})_{\max} - x_{ij}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} \quad (4)$$

Третій крок передбачає обчислення інформаційної ентропії (E) кожного оцінюваного параметра за формулою, введеною Клодом Шенноном [13] (4):

$$E_n = - \left(\frac{1}{\ln n} \right) \sum_{i=1}^m V_{ij} \ln V_{ij} \quad (5)$$

де n – кількість точок відбору проб, а V_{ij} – ймовірність появи нормалізованого значення (v_{ij}) оцінюваного параметра j у i -й вибірці, що визначається наступним чином:

$$V_{ij} = \frac{v_{ij}}{\sum v_{ij}} \quad (6)$$

Четвертий крок включає обчислення ентропійних ваг (W), щоб параметрам з нижчою ентропією

або мірою безпорядку присвоювалася таким чином більша вага:

$$W_j = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^t (1 - E_j) \quad (7)$$

Параметрам з меншою ентропією присвоюється більша вага, оскільки вони вказують на наявність більш структурованої системи, яка є більш організованою і менш випадковою, а тому може бути більш інформативною для оцінки якості води.

Нарешті, агрегація ваг ентропії та шкали оцінки якості в індекс ЕІЯВ виражається наступним чином:

$$EWQI = \sum_{j=1}^n W_j U_j, \quad (8)$$

де $EWQI$ – ентропійнозважений індекс якості води; U_j для кожного параметра задається як відношення контрольованого значення j -го параметра (I_j) до його стандартного значення (S_j):

$$U_j = \left(\frac{I_j}{S_j} \right) \times 100. \quad (9)$$

Відповідно до шкали класифікації якості води, запропонованої [22], якість води визначається за п'ятьма класами: від «відмінна якість вода» до «надзвичайно погана якість вода». Стандарти класифікації наведені в таблиці 1.

В цілому, згідно ДСТУ 4808:2007 «Джерела централізованого питного водопостачання. Гігієнічні та екологічні вимоги щодо якості води і правила вибирання» якість води на досліджуваній ділянці ріки Дніпро відноситься за двома показниками (сухий залишок та хлориди) до 4 класу та характеризується як посередня, обмежено придатна, небажана якість води (табл. 2).

Таблиця 1

Шкала якості води [14]

EWQI	Клас	Якість води
<50	1	Відмінна якість води
50~100	2	Хороша якість води
100~150	3	Середня або середня якість води
150~200	4	Погана якість води
>200	5	Надзвичайно погана якість води

Для подальших розрахунків у якості нормативного значення було використано показники нижньої межі 3-го класу якості води за ДСТУ 4808:2007.

Звертають на себе увагу значна різниця між медіаною та середнім значенням для сухого залишку та хлоридів, високі концентрації яких характерні для одного із пунктів контролю.

Враховуючи, що на процеси, які формують екологічний стан води, має місце вплив температурного режиму, розрахунки ентропійного індексу якості води були проведені для теплого (квітень – жовтень) та холодного (дистопад – березень) періоду року. Результати розрахунку індексу якості води з ураху-

Таблиця 2

Загальна екологічна характеристика якості води

Забруднююча речовина	Середнє	Медіана	Норматив	Клас якості за ДСТУ 4808:2007
Завислі речовини, мг/дм ³	6,64	6,15	1501	1
Сухий залишок, мг/дм ³	1007,03	311,00	651	4
Розчинений кисень, мгО ₂ /дм ³	9,34	9,47	7	1
БСК 5, мгО/дм ³	2,68	2,40	3,1	2
ХСК, мгО/дм ³	30,54	29,75	31	3
Хлоридні іони, мг/дм ³	308,75	37,79	101	4
Сульфатні іони, мг/дм ³	180,48	49,95	121	3
Загальна жорсткість мг-екв/дм ³	6,77	3,40	5,1	3
Азот амонійний, мг/дм ³	0,23	0,23	0,31	2
Азот нітритний, мг/дм ³	0,01	0,01	0,011	2
Азот нітратний, мг/дм ³	0,38	0,29	0,51	2
Фосфатні іони, мг/дм ³	0,18	0,16	0,051	3
Залізо загальне, мг/дм ³	0,14	0,12	101	1
Марганець, мг/дм ³	0,04	0,02	101	1
Нафтопро дукти, мг/дм ³	0,04	0,04	51	1
Кольоровість, град.	10,75	10,99	81	1

ванням ентропійного вагового коефіцієнту наведені у табл. 3.

Згідно зі шкалою (табл. 2) у пункті спостережень п2 вода відноситься до 3-го класу – середня якість води, за іншими пунктами контролю – до 2-го класу – хороша якість води. Мінімальне значення EWQI для холодної пори 55,41 (п4), максимальне – 111,02 (п2). Мінімальне значення EWQI для теплої пори 72,76 (п4), максимальне – 104,50 (п2).

З наведеного графіку видно, що, в цілому, для теплої пори року ентропійний індекс якості води вищий, ніж холодної пори.

Найгірша якість води характерна для пункту контролю п2 (ID27577, р.Дніпро, 219 км, с. Придніпровське, КП «Дніпро» Придніпровської с/р), при чому, значення для холодної пори року EWQI=111,02 вищі, ніж для теплої – EWQI=104,50, що вказує на те, що забруднення не обумовлено біохімічними процесами, і може пояснюватися негативним екологічним впливом Новопавлівського гранітного кар'єру.

Головні висновки. В результаті застосування методики оцінки екологічного стану водойми на основі ентропійно-зваженого індексу якості води

Таблиця 3

Результати розрахунку ентропійно зваженого індексу якості води (EWQI)

EWQI	п1	клас	п2	клас	п3	клас	п4	клас	п5	клас
Теплий період	75,04	2	104,50	3	79,82	2	72,76	2	78,66	2
Холодний період	61,38	2	111,02	3	60,84	2	55,41	2	62,16	2

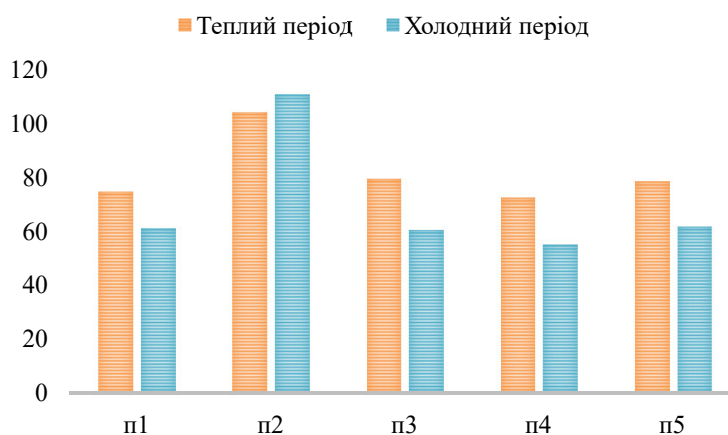


Рис. 1. Динаміка EWQI за пунктами контролю

ділянки р. Дніпро, що розташована на півдні Дніпропетровської області, встановлено, за значенням індексу якості у теплий та холодний періоди року відрізняється. Мінімальне значення EWQI для холодної пори 55,41 (п4), максимальне – 111,02 (п2). Мінімальне значення EWQI для теплої пори 72,76 (п4), максимальне – 104,50 (п2). Найгірша якість води характерна для пункту контролю п2 (ID27577, р. Дніпро, 219 км, с. Придніпровське, КП «Дніпро» Придніпровської с/р), при чому, значення для холодної пори року EWQI=111,02 вищі,

ніж для теплої – EWQI=104,50, що вказує на те, що забруднення не обумовлено біохімічними процесами, і може пояснюватися негативним екологічним впливом Новопавлівського гранітного кар'єру.

Перспективи подальших досліджень. На величину ентропійно зваженого індексу якості води впливає вибір нормативного значення, тому перспективними є дослідження з обґрунтування вибору величини нормативного значення для кожних конкретних умов.

Література

1. Безсонний В.Л., Пляцук Л.Д., Третяков О. В. Засоби математичного прогнозування оцінки екологічного стан поверхневих водних об'єктів. *Екологічні науки : науково-практичний журнал*. 2022. № 5(44). С. 64–68. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.9>
2. Sutadian A.D., Muttill N., Yilmaz A.G., Perera B.J.C. Development of a water quality index for rivers in West Java Province, Indonesia. *Ecol Indic*. 2018. 85:966–982.
3. Sutadian A.D., Muttill N., Yilmaz A.G., Perera B.J.C. () Development of river water quality indices – a review. *Environ Monit Assess*. 2016. 188(1):58.
4. Ewaid S.H., Abed S.A. Water quality index for Al-Gharraf River, southern Iraq. *Egypt J Aquat Res*. 2017. 43(2):117–122.
5. Medeiros A.C., Faial K.R.F., Faial K.D.C.F., da Silva Lopes I.D., de Oliveira Lima M., Guimarães R.M., Mendonça N.M. Quality index of the surface water of Amazonian rivers in industrial areas in Pará, Brazil. *Mar Pollut Bull*. 2017. 123(1–2):156–164.
6. Yaseen Z.M., Ramal M.M., Diop L., Jaafar O., Demir V., Kisi O. Hybrid adaptive neuro-fuzzy models for water quality index estimation. *Water Resour Manage*. 2018. 32(7):2227–2245.
7. Simonyan G. Systemic-Entropic Approach for Assessing Water Quality of Rivers, Reservoirs, and Lakes. In A. Devlin, J. Pan, & M. M. Shah (Eds.), *Inland Waters – Dynamics and Ecology*. *IntechOpen*. 2020. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93220>
8. Simonyan G., Pirumyan G. Entropy – System Approach to Assess the Ecological Status of Reservoirs in Armenia. *Preprints, 2019*. 2019010260. doi: 10.20944/preprints201901.0260.v1).
9. Безсонний В. Л., Третяков О. В., Пляцук Л. Д., Некос А. Н. Ентропійний підхід до оцінки екологічного стану водотоку. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія»*. 2022. Вип. 28. С. 6–19.
10. Li P., Qian H., Wu J. Groundwater quality assessment based on improved water quality index in Pengyang County, Ningxia, Northwest China. *J Chem*. 2010. 7(S1):S209–S216.
11. Amiri V., Rezaei M., Sohrabi N. Groundwater quality assessment using entropy weighted water quality index (EWQI) in Lenjanat, Iran. *Environ Earth Sci* 2014. 72(9):3479–3490.
12. Ashby W. *Introduction to cybernetics*. 1959. М.: IL. 432 p.
13. Shannon C. *Works on information theory and cybernetics*. 1963. М.: IL. 830 p.
14. Wu J., Li P., Qian H. Groundwater quality in Jingyuan County, a semi-humid area in Northwest China. *J Chem*. 2011. 8(2):787–793.