

УДК 504.054:628.4.038

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2023.1\(490\).24](https://doi.org/10.15589/znп2023.1(490).24)**ANALYSIS OF THE ENVIRONMENTAL STATE OF THE KAKHIV RESERVOIR
BASED ON THE ENTROPY INDEX****АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА
НА ПІДСТАВІ ЕНТРОПІЙНОГО ІНДЕКСУ****Vitalii L. Bezsonnyi¹**

bezsonny@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8089-7724

Leonid D. Plyatsuk²

l.plyacuk@ecolog.sumdu.edu.ua

ORCID: 0000-0003-0095-5846

Oleh V. Tretyakov³

e-mail: mega_ovtr@ukr.net

ORCID: 0000-0002-0457-9553

В. Л. Безсонний¹,

канд. техн. наук

Л. Д. Пляцук²,

докт. техн. наук, професор

О. В. Третьяков³,

докт. техн. наук, професор

*Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv¹**Sumy State University, Sumy²**National Aviation University, Kyiv³**Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків¹**Сумський державний університет, м. Суми²**Національний авіаційний університет, м. Київ³*

Abstract. Purpose. Assessment of the water quality of the Kakhov reservoir based on the entropy index. **Method.** Analysis of information sources, analytical-synthetic method, entropy analysis, which consists in calculating the entropy index of quality based on the Shannon index. **Results.** Water according to indicators of nitrates and phosphates according to DSTU 4808:2007 belongs to class 4 – mediocre, limitedly suitable, undesirable water quality (water class is determined by the worst indicator). The chloride indicator at point 2 (500 m below the discharge of the Central treatment facilities of KP “Vodokanal” in Zaporizhzhya) transfers the quality class from 2 to 3. There is a decrease in the level of BSK₅ at the monitoring post in the lower part of the reservoir, which indicates the entry of substances into the watercourse that inhibit biochemical processes. There is also an increasing trend in the content of sulfates, phosphates, nitrogen compounds and HSC in water for control points located within the influence of industrial cities, along the reservoir. The entropy index of water quality has the highest values in points n2 (0.59169) and n7 (0.64082). Control point p2 is located 500 m below the place of discharge of wastewater of the central treatment facilities of the city of Zaporizhzhia, p7 – in the lower part of the reservoir. It is obvious that the main contribution to the formation of water quality is caused by industry, the communal sector and agricultural production. The lowest value of the index (0.48581) is characteristic of point p1 – the upper beif of the Dniprovska HPP, the drinking water intake of the city. **Scientific novelty.** An analysis of the ecological state of the Kakhov reservoir was carried out on the basis of the entropy index. **Practical importance.** As a result of the assessment of the water quality of the Kakhovsky Reservoir, it was established that the main water pollutants are nitrites, nitrates, phosphates and suspended solids. It can cause a negative impact on health due to mutagenic and carcinogenic effects, and also accelerates the eutrophication of the water body. There is a negative impact of industrial production on the ecological condition of the Kakhovsky Reservoir. The value of the entropy index of water quality varies from 0.48581 (item p1) to 0.64082 (item p7).

Key words: entropy index of water quality; ecological condition of surface waters; Kakhov reservoir; pollution.

Анотація. Мета. Оцінка якості води Каховського водосховища на підставі ентропійного індексу. **Методика.** Аналіз інформаційних джерел, аналітико-синтетичний метод, ентропійний аналіз, який полягає у розрахунку ентропійного індексу якості на основі індексу Шеннона. **Результати.** Вода за показниками нітратів і фосфатів згідно ДСТУ 4808:2007 відноситься до 4 класу – посередня, обмежено придатна, небажана якість води (клас води визначається найгіршим показником). Показник хлоридів у пункті 2 (500 м нижче скиду

Центральних очисних споруд КП «Водоканал» м. Запоріжжя) переводить клас якості з 2 до 3-го. Спостерігається зниження рівня БСК₅ на посту моніторингу в нижній частині водосховища, що свідчить про надходження до водотоку речовин, що пригнічують біохімічні процеси. Також спостерігається тенденція зростання вмісту у воді сульфатів, фосфатів, сполук азоту та ХСК для пунктів контролю, що розташовані в межах впливу промислових міст, вздовж водосховища. Ентропійний індекс якості води має найбільші значення у пунктах п2 (0,59169) та п7 (0,64082). Пункт контролю п2 знаходиться на 500 м нижче місця скиду стічних вод центральних очисних споруд м. Запоріжжя, п7 – в нижній частині водосховища. Очевидно, що, основний вклад у формуванні якості води спричиняють промисловість, комунальна сфера і сільськогосподарське виробництво. Найменше значення індексу (0,48581) характерне для пункту п1 – верхній б'єф Дніпровської ГЕС, питний водозабір міста. *Наукова новизна.* Проведено наліз екологічного стану Каховського водосховища на підставі ентропійного індексу. *Практична значимість.* В результаті оцінка якості води Каховського водосховища встановлено, що основними забруднювачами води є нітрити, нітрати та фосфати і завислі речовини. Це може спричинити негативний вплив на здоров'я, внаслідок мутагенної та канцерогенної дії, також прискорює евтрофікацію водного об'єкту. Спостерігається негативний вплив промислового виробництва на екологічний стан Каховського водосховища. Величина ентропійного індексу якості води коливається від 0,48581 (пункт п1) до 0,64082 (пункт п7).

Ключові слова: ентропійний індекс якості води; екологічний стан поверхневих вод; Каховське водосховище; забруднення.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Антропогенне навантаження на території водозборів на тлі скорочення обсягів водоохоронних заходів веде до зростання забруднення поверхневих водних об'єктів. Забруднені водойми та водотоки стають не придатними для питного, а іноді і технічного водокористування, втрачають рибогосподарське значення та стають не придатними для сільськогосподарських потреб. Сучасні концепції оцінювання ризиків позиціонується як головний механізму прийняття рішень з управління практично у всіх країнах як на регіональному або державному рівнях, так і на рівні потенціального джерела забруднення навколишнього природного середовища чи окремого виробництва.

Антропогенна діяльність та природні процеси, включаючи вивітрювання гірських порід, ерозію та зміну клімату, впливають на якість води [1, с. 241; 2, с. 4151]. Збільшення кількості населення, розширення сфер та видів діяльності, розростання міст призводять до збільшення попиту на воду. Надмірне використання підземних і поверхневих вод ставить під загрозу безпеку багатьох ресурсів через скорочення їх обсягів та погіршення їх якості [3, с. 282].

Якість водних ресурсів має велике значення для здоров'я людини, економічного розвитку та довкілля [4, с. 27225; 5, с. 1 68]. Глобальне використання прісної води, в тому числі комунальною сферою, сільським господарством та промисловістю стрімко зросло за останні 100 років. Але через забруднення води в різних регіонах і країнах [6, с. 158] погіршення якості води переросло у загальносвітову проблему [7, с. 117821]. Забруднення поверхневих вод є великою проблемою при управлінні якістю води. Оцінка якості води – важливий елемент управління водними ресурсами. При розробці планів управління водними ресурсами необхідно оцінювати різні властивос-

ті поверхневих вод. Забруднення водойм загрожує навколишньому середовищу та здоров'ю людей, тому для оцінки якості води було розроблено багато індексів якості поверхневих вод [8, с. 551; 9, с. 8].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Система загальних показників, що дозволяють систематизувати різні параметри якості води, вперше була розроблена Хортоном [10, с. 395]. Потім ця методологія була вдосконалена Національним фондом санітарії США, це призвело до виникнення відомого індексу якості води [11], що показував рівень сумарного впливу обраних параметрів на загальну якість води одним числовим значенням [12, с. 3; 13, с. 58; 14, с. 75, 15, с. 100245]. Цей підхід став дуже поширеним у світовій практиці для оцінки якості води [16, с. 87; 17, с. 1317; 18, с. 20; 19, с. 160; 20, с. 4232; 21, с. 253]. Екологічна оцінка якості води є вкрай необхідною умовою для реалізації водоохоронної політики і оптимального розподілу різноманітних джерел води відповідно до видів використання. Поверхневі води часто оцінюються на підставі нормативів. Оскільки жодна окрема змінна не може достатньо описати якість води, оцінюється ряд фізико-хімічних інтенсивних змінних (наприклад, концентрації аніонів або катіонів тощо). Також набуває поширення використання ентропійних підходів до оцінки якості води [22, с. 93220; 23, с. 201901].

У гідроекологічних системах можливе виникнення проблем як із збільшенням, так і зниженням ентропії. Поняття ентропії має багато тлумачень в різноманітних наукових галузях. Поряд з ентропією Клаузіуса з'явилися інформаційні, статистичні, математичні, лінгвістичні, інтелектуальні та інші ентропії. Ентропія стала базовим поняттям теорії інформації і виступає мірилом невизначеності ситуації. Для

характеристики міри складності системи У. Ешбі першим запропонував використовувати поняття ентропії [24, с. 20]. Система взаємодіє із зовнішнім світом як єдине ціле. Загалом, система не втрачає своєї організованості або високої впорядкованості. Відкриті системи можуть обмінюватися матерією, енергією і, не в останню чергу, інформацією з довкіллям. Щоб екологічна система могла діяти і взаємодіяти з довкіллям, вона повинна отримувати інформацію з нього і доносити інформацію до зовнішнього середовища. Це процес інформаційного метаболізму, що спільно з матеріальним метаболізмом утворює повний метаболізм. Вперше поняття ентропії та інформації пов'язав К. Шеннон [25, с. 10]. За Шенноном ентропія – це кількість інформації, яка припадає на одне елементарне повідомлення джерела, що виробляє статистично незалежні повідомлення. Отримання будь-якої кількості інформації дорівнює втраченій ентропії. Інформаційна ентропія незалежних випадкових подій x з N можливих станів розраховуються за формулою (1):

$$H = -\sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i \quad (1)$$

де: p_i – ймовірність частоти настання якоїсь події.

Першим для оцінки ступеню структурованості екосистем Мак-Артур 1955 року використав загальне рівняння ентропії Шеннона [26, с. 533], де $p_i = n_i/N$, в якому n_i – загальне число особин виду i , N – загальне число особин в екосистемі). У 1957 році Р. Маргалеф постулював теоретичну концепцію, відповідно до якої різноманітність відповідає ентропії при випадковому відборі видів з угруповання [27, с. 36]. Результатом цих робіт є широке поширення і загально визнаність індексу Шеннона H , який іноді називають індексом інформаційної різноманітності К. Шеннона [25, с. 533]. Розраховуючи ентропію H за Шенноном вважається, що кожна проба – це випадкова вибірка із сукупності, де співвідношення видів у пробі відображає їх реальне співвідношення у природі. У якості оцінки ймовірності незалежних подій p_i для формули (1):

$$H = -\sum \left(\frac{n_i}{N} \right) \log_2 \left(\frac{n_i}{N} \right) \quad (2)$$

Для комплексної оцінки екологічного стану поверхневих вод використовується ентропійний індекс якості води – G , що отримується із індексу Шеннона [25, с. 533]. Поверхневі води – це одне із основних джерел питного водопостачання. Забруднені водні об'єкти стають не придатними для питного, а іноді і технічного водокористування, втрачають рибогосподарське значення та стають не придатними для сільського господарства. Тому оцінка екологічного стану поверхневих водних об'єктів є актуальною проблемою.

До головних джерел забруднення Каховського водосховища відносяться скиди стічних вод у річку без належної обробки, самовільне скидання стічних та забруднених вод, недотримання водоохоронного режиму в прибережних смугах і водоохоронних зонах, ерозійні процеси узбережжя. Тобто антропогенний вплив є суттєвим фактором функціонування річкової екосистеми, що призводить до порушення природного стану водотоку та погіршує якість води в річці Дніпро та Каховському водосховищі. Надходження забруднюючих речовин стічними водами в Дніпро ускладнює процес очищення води і вимагає збільшення на це енергетичних витрат.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

При дослідженні екологічного стану поверхневого водного об'єкту дуже важливим є наявність якомога повної інформації з мережі моніторингу за якомога більший період часу, для коректного розрахунку «традиційних» індексів якості води також є важливим, щоб для розрахунків використовувалися синхронні показники якості, тобто кількість результатів вимірювань має бути однаковою для усіх досліджуваних точок контролю, що а практиці є практично неможливою задачею. Застосування ентропійного підходу дозволяє уникнути цієї проблеми та здійснити коректну оцінку і порівняння серед пунктів моніторингу за наявності неповної та несинхронної інформації.

Метою дослідження є оцінка якості води Каховського водосховища за допомогою ентропійного індексу. Для цього оцінимо динаміку зміни основних забруднюючих компонентів та визначити ентропійний індекс якості води.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Каховське водосховище – одне з водосховищ на Дніпрі, у межах Запорізької, Дніпропетровської та Херсонської областей. Введене в експлуатацію 1956. Гідровузл Каховської ГЕС ім. П. Непорожного розташований поблизу м. Нова Каховка Херсонської області. Повний об'єм водосховища 18,18 км³, корисний – 6,78 км³, глибина 8,4 м (максимальна – 32 м). Нормальний підпертий рівень (НПР) 16 м, горизонт мертвого об'єму 12,7 м, площа дзеркала при НПР 2150 км². Середній багаторічний стік у створі гідровузла 52,2 км³/рік. Водосховище використовують для сезонного і річного регулювання стоку, а також регулювання високих і катастрофічних повеней при повному використанні робочого та резервного об'ємів. Каховське водосховище – основне джерело водопостачання на півдні України [28, с. 11146].

Для оцінки якості води було використано відкриті дані щодо моніторингу якості поверхневих вод Державного агентства водних ресурсів України (період спостережень 2003–2022 роки).

Аналізувалися результати спостережень за 7 пунктами моніторингу (табл. 1, рис 1). Пункти моніторингу були обрані таким чином, щоб мати можливість оцінити антропогенний вплив великих міст, розташованих вздовж водосховища, від верхнього б'єфу Дніпровської ГЕС до нижньої частини водосховища, смт Велика Лепетиха.

Забруднення поверхневих водних систем можна подати у вигляді системи тих гідрохімічних показників (елементів), концентрація яких перевищує нормативно встановлені концентрації. Тоді у рівнянні Шеннона p_i – це ймовірність числа перевищень нормативу i -ї речовини чи показника якості води від загальної суми перевищення нормативу – N , $p_i = n/N$.

G -функція, що характеризує гідроекологічні системи з позиції співвідношення порядку та хаосу, мірами яких є геоекологічна синтропія – I [23, с. 201901] та ентропія Шенонна, відповідно,

$$G = \frac{H}{I}. \quad (3)$$

$$H = \log_2 N - I \quad (4)$$

$$I = \frac{\sum n \log_2 n}{N} \quad (5)$$

Значення G -функції показують те, що саме та в якій мірі переважає у системі. Наприклад, якщо $G < 1$ – в структурі системи переважає порядок, в іншому випадку, коли $G > 1$, – переважає хаос. При $G = 1$ хаос і порядок урівноважують одне одного та структурна організація системи є рівноважною.

Для виконання розрахунку I , H та G скористаємося наступним обчислювальним алгоритмом.

1. Визначимо число перевищень нормативу i -ї речовини (показника якості води) n .

2. Оцінимо загальну суму перевищень нормативу (N): $N = \sum n$.

3. Обчислимо $\log_2 N$, $n \log_2 n$ та $\sum n \log_2 n$.

4. Розраховуємо геоекологічну синтропію I (5) та ентропію H (4).

5. Визначаємо ентропійний індекс якості води G (3)



Рис. 1. Розташування постів контролю якості води (Карта: QGIS, OpenStreetMap)

Таблиця 1. Гідрологічні пости контролю якості води

№ точки	ID поста	Назва поста
Пункт 1	27076	р. Дніпро, 328 км, м. Запоріжжя, в/б'єф Дніпровської ГЕС, питний в/з міста
Пункт 2	27089	р. Дніпро, 312 км, м. Запоріжжя, 500 м нижче скиду ЦОС-1 КП "Водоканал" (лівий берег р.Дніпро)
Пункт 3	27091	р. Дніпро, 256 км, м. Енергодар
Пункт 4	27092	р. Дніпро, 253 км, м. Енергодар, вплив Запорізької АЕС
Пункт 5	27094	р. Дніпро, 245 км, м. Марганець, питний в/з
Пункт 6	27095	р. Дніпро, 228 км, м. Нікополь, питний в/з
Пункт 7	27111	р. Дніпро, 160 км, смт. Велика Лепетиха

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Оцінимо ретроспективну динаміку зміни показників екологічного стану води Каховського водосховища. У табл. 3 наведено усереднені дані спостережень за період 2003–2022 років за 7 пунктами моніторингу поверхневих вод ділянки Каховського водосховища. Для порівняння додано нормативні значення показників, що відповідають нижній межі 2-го класу якості води за ДСТУ 4808:2007 [29, с. 9]. Усього в ДСТУ 4808:2007 виділяється 4 класи якості води:

- 1 клас – відмінна, бажана якість води;
- 2 клас – добра, прийнятна якість води;
- 3 клас – задовільна, прийнятна якість води;
- 4 клас – посередня, обмежено придатна, небажана якість води.

З наведеної таблиці видно, що вода за показниками нітратів і фосфатів згідно ДСТУ 4808:2007 відноситься до 4 класу – посередня, обмежено придатна, небажана якість води (клас води визначається найгіршим показником). Також із таблиці можна бачити, що показник хлоридів у пункті 2 (500 м нижче скиду Центральних очисних споруд КП «Водоканал» м. Запоріжжя) переводить клас якості з 2 до 3-го.

Відслідковуємо динаміку основних забруднювачів вздовж за постами вздовж водосховища.

Спостерігається зниження рівня БСК₅ на постах в м. Запоріжжя (вплив ЦОС-1) м. Енергодар (вплив АЕС), та у м. Нікополь, що свідчить про надходження до водотоку органічних речовин, що активізують біохімічні процеси. Біохімічне споживання кисню є важливим показником оцінки стану водного об'єкту, це кількість кисню, потрібна для окиснення органічних речовин, що містяться в 1 дм³ води, аеробними бактеріями до вуглекислого газу та води впродовж 5 діб без доступу повітря і світла.

Така ж тенденція спостерігається щодо динаміки сполук азоту, сульфатів, фосфатів, ХСК та СПАР – підвищення в межах точок контролю поблизу промислових центрів та зниження концентрацій у нижній частині водосховища.

Сполуки азоту можуть потрапляти до води за рахунок розкладу органічних речовин тваринного та рослинного походження. Крім того, іони амонію потрапляють до водосховищ зі стічними промисловими водами. Окислення іонів амонію розчиненим у воді киснем до нітрат-іонів – одна з причин збільшення нітратів. Це небезпечно для здоров'я населення, оскільки пов'язано з роллю нітратів у синтезі нітрозамінів та нітрозамідів, у навколишньому середовищі (у воді, ґрунті, рослинах) та в організмі людини (у травному каналі). Нітрозамідам та нітрозамінам властива мутагенна та канцерогенна дія. Тому підвищений вміст нітратів у воді сприяє підвищенню ризику онкогенної захворюваності населення. Крім того, підвищений вміст азотовмісних речовин провокує процеси евтрофікації водойми.

Потрапляння води водосховища сульфатів та фосфатів характерне для процесів діяльності житлово-комунального господарства прилеглих міст. Хоча для систем централізованого водовідведення і встановлені нормативи вмісту фосфатів у стічних водах, але використання фосфатів у побутовій хімії засобах залишається ненормованим. Сульфати разом з хлоридами є найпоширенішими видами забруднення у воді. Вони потрапляють у воду внаслідок вимивання осадових гірських порід, вилугування ґрунту та іноді внаслідок окислення сульфідів та сірки – продуктів розкладу білку із стічних вод. Вміст сульфатів у воді вище нормативного може бути причиною захворювань органів системи травлення, також ця вода може викликати корозію бетону та залізобетонних конструкцій, що є небезпечним для водосховищ [30, с. 316].

Обговорення отриманих результатів

Розрахунок ентропійного індексу відповідно до алгоритму (3) – (5) наводиться в табл. 3 та табл. 4. Динаміка індексу за пунктами контролю зображена на графіку (рис. 7).

Як видно з графіку (рис. 7) найбільші значення ентропійного індексу якості води характерні для пунктів п2 (0,59169) та п7 (0,64082). Високе значення

Таблиця 2. Середньорічні значення показників якості води за 2003–2022 рр.

	п1	п2	п3	п4	п5	п6	п7	Норматив
БСК ₅ , мг/дм ³	2,552	2,968	2,661	2,757	2,322	2,656	2,031	1,3
Завислі речовини, мг/дм ³	4,442	4,732	5,004	4,542	5,435	5,608	2,239	0,75
Кисень, мг/дм ³	8,983	8,581	8,412	8,633	8,810	9,335	8,324	8
Сульфати, мг/дм ³	46,438	67,391	50,551	54,289	55,810	53,172	54,007	40
Хлориди, мг/дм ³	29,922	41,424	33,212	34,763	33,908	33,762	30,361	30
Амоній, мг/дм ³	0,299	0,320	0,295	0,268	0,293	0,285	0,244	0,1
Нітрати, мг/дм ³	1,613	1,944	1,569	1,603	1,993	1,890	0,714	0,2
Нітрити, мг/дм ³	0,038	0,038	0,037	0,032	0,043	0,042	0,009	0,002
Фосфати, мг/дм ³	0,345	0,330	0,339	0,362	0,319	0,306	0,201	0,015
СПАР, мг/дм ³	0,019	0,030	0,030	0,031	0,017	0,021	0,001	10
ХСК, мг/дм ³	22,750	24,623	23,488	23,972	28,955	29,347	26,930	9

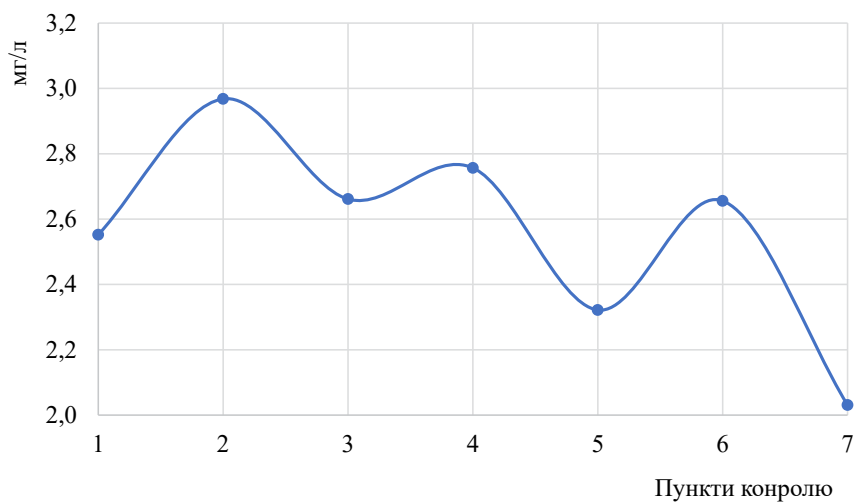


Рис. 2. Динаміка БСК₅ за пунктами контролю

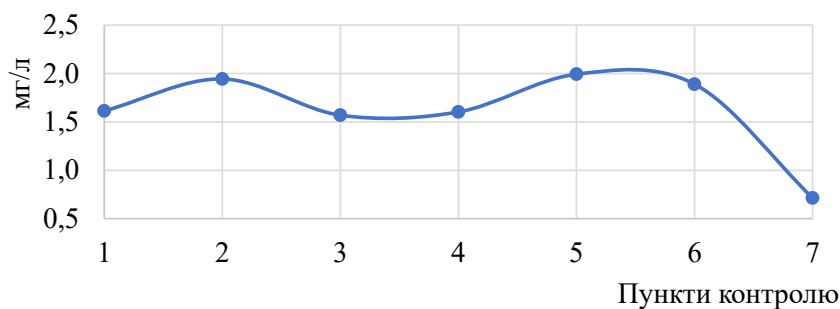


Рис. 3. Динаміка нітратів за пунктами контролю

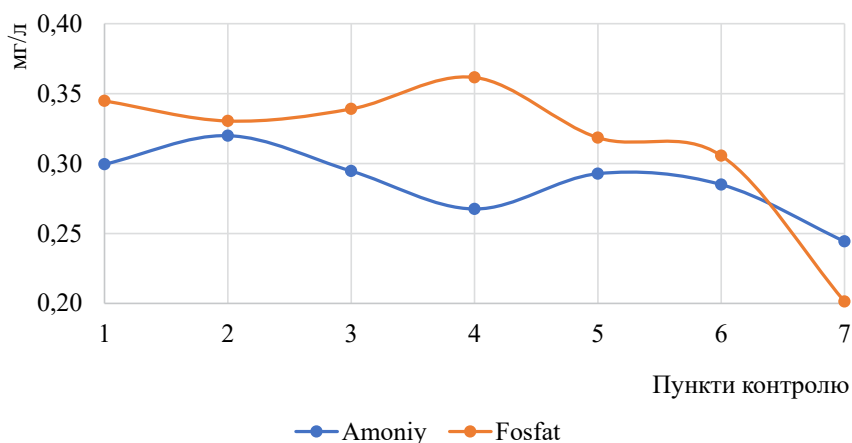


Рис. 4. Динаміка амонію та фосфатів за пунктами контролю

індексу для пункти контролю п2 пояснюється тим, що він знаходиться за 500 м нижче місця скиду Центральних очисних споруд № 1 м. Запоріжжя. Привертає увагу високе значення ентропійного індексу для пункту п7, що вимагає подальший додаткових досліджень та досконального виявлення причин цього яви-

ща, оскільки значення БСК, сполук азоту та фосфору на цій ділянці найнижчі і можна виключити вплив сільського господарства (у вигляді змиву до водосховища мінеральних добрив), очевидно, на екологічний стан нижньої частини водосховища впливає промисловість.

Дніпро є одним головних поверхневих джерел питного водопостачання нашої держави, у зв'язку з чим потрібно враховувати, що традиційна біологічна очистка дозволяє видалити основну масу органічно забруднюючих речовин, але не спроможна забезпечити достатню, відповідно до сучасних вимог,

глибину видалення сполук азоту та фосфору, а також органічних речовин (БСК, ХСК). У процесі очистки відбувається трансформація та часткове (20–40 %) видалення амонійного азоту та фосфору. При цьому під час очистки протікають процеси амоніфікації та наступної нітрифікації азоту, а також гідроліз сполук

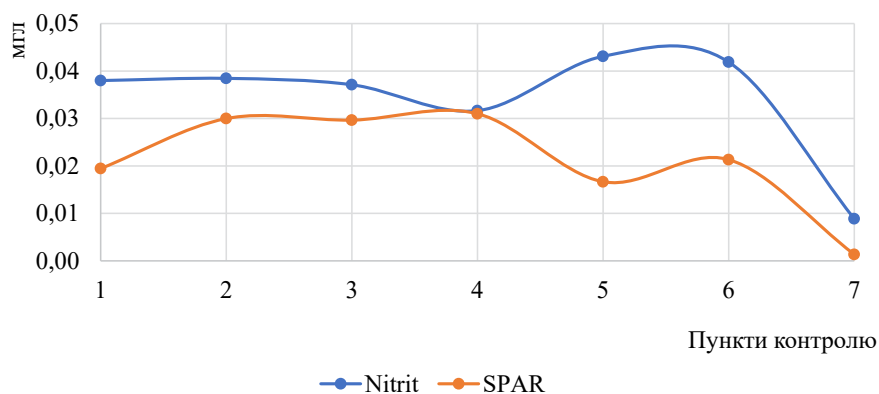


Рис. 5. Динаміка нітритів та СПАР за пунктами контролю

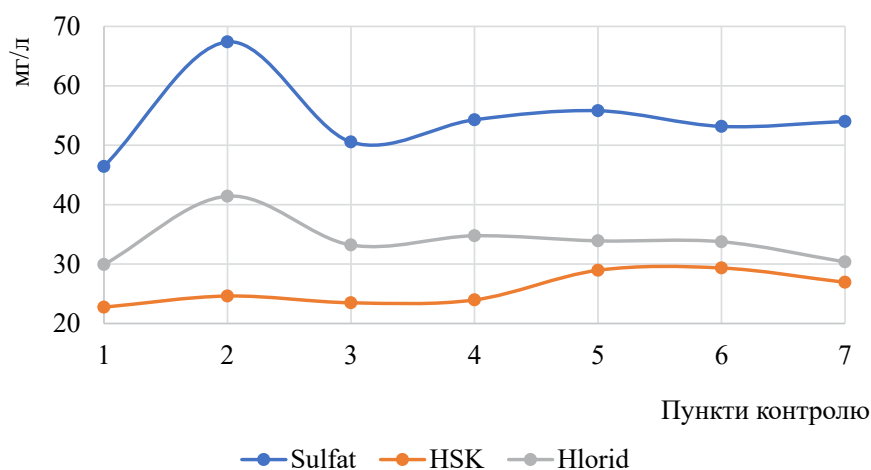


Рис. 6. Динаміка сульфатів, ХСК та хлоридів за пунктами контролю

Таблиця 3. Число перевищень нормативу і-го показника якості води

Показники якості води	n у пунктах контролю						
	n1	n2	n3	n4	n5	n6	n7
БСК ₅	119	52	73	85	72	90	36
Завислі речовини	115	50	73	86	82	98	23
Кисень	90	34	45	61	59	79	25
Сульфати	92	47	61	73	65	81	37
Хлориди	77	41	47	67	60	71	20
Амоній	120	49	73	77	87	99	44
Нітрати	120	51	73	85	87	100	29
Нітрити	125	51	73	86	87	101	11
Фосфати	124	52	73	86	87	101	40
СПАР	0	0	0	0	0	0	0
ХСК	122	53	73	86	87	101	44

Таблиця 4. Розрахунки ентропійного індексу якості води

Значення	п1	п2	п3	п4	п5	п6	п7
N	1104	480	664	792	773	921	309
$\log_2 N$	10,1085	8,90689	9,37504	9,62936	9,59432	9,84706	8,27146
$\sum n \log_2 n$	7510,94	2686,03	4032,97	5002,83	4861,18	6018,8	1557,69
I	6,80339	5,59589	6,07376	6,31671	6,28872	6,53507	5,04106
H	3,30514	3,311	3,30128	3,31265	3,30561	3,31199	3,23041
G	0,48581	0,59169	0,54353	0,52443	0,52564	0,5068	0,64082

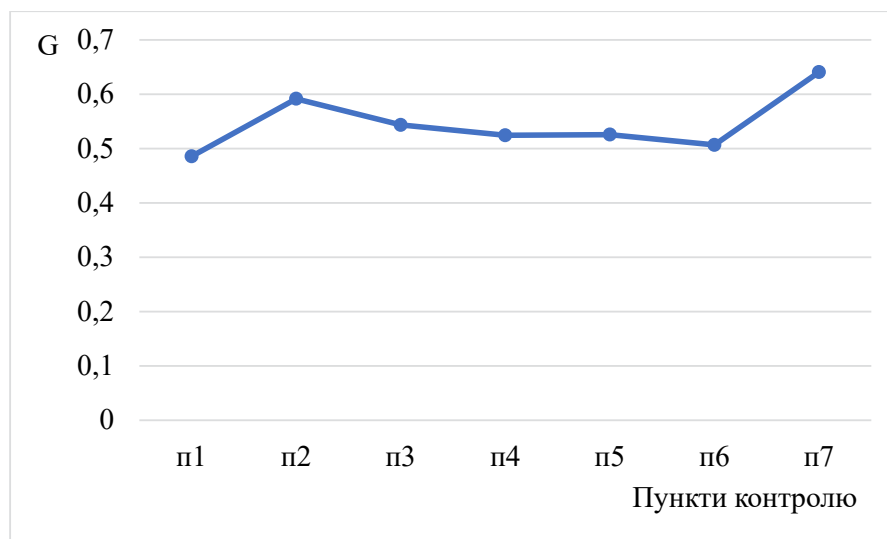


Рис. 7. Динаміка ентропійного індексу якості води за пунктами контролю

фосфору. Сьогодні більше уваги приділяється зменшенню надходження фосфору через те, що вважається, що здійснення контролю над процесом евтрофікації водойм залежить, в основному, від зниження концентрації саме фосфору. Однак, не менш важливо те, що видаляти зі стічних вод сполуки азоту набагато важче [31, с. 17, 32, с. 40]. Для підвищення ефективності очистки стічних вод від сполук фосфору використовують мінеральні коагулянти. Всі методи очищення вод мають своє розповсюдження в різних галузях промисловості, мають ряд недоліків, і не завжди можуть бути застосовані на практиці очищення стічних вод від біогенних елементів.

ВИСНОВКИ

В результаті аналізу екологічного стану вод Каховського водосховища за допомогою ентропійного індексу встановлено, що основними забруднювачами води є нітрати, нітрити та фосфати і завислі речовини, що може викликати негативний вплив на здоров'я внаслідок канцерогенної та мутагенної дії, а також прискорює евтрофікацію водотоку. Спостерігається негативний вплив як промисловості, агропромислового виробництва та комунальної сфери на екологічний стан Каховського водосховища. Значення ентропійного індексу якості води знаходиться в межах від 0,48581 (пункт т1) до 0,64082 (пункт т7).

REFERENCES

- [1] Lan, J., Wang, T., Chawchai, S., Cheng, P., Zhou, K., Yu, K., Yan, D. et al. (2020). Time marker of ^{137}Cs fallout maximum in lake sediments of Northwest China *Quaternary Science Reviews*, 241, doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106413.
- [2] Massoud, M. (2012). Assessment of water quality along a recreational section of the Damour River in Lebanon using the water quality index. *Environ. Monit. Assess.*, 184, 4151–4160, doi:10.1007/s10661-011-2251-z.
- [3] Lyu, H.M., Shen, S.L., & Zhou A. (2021). The development of IFN-SPA: A new risk assessment method of urban water quality and its application in Shanghai. *Journal of Cleaner Production*, 282, doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124542.
- [4] Alver, A. (2019). Evaluation of conventional drinking water treatment plant efficiency according to water quality index and health risk assessment. *Environ Sci Pollut Res*, 26, 27225–27238. doi.org/10.1007/s11356-019-05801-y
- [5] Liu, D., Du, Y., Yu, S., Luo, J., & Duan, H. (2020) Human activities determine quantity and composition of dissolved organic matter in lakes along the Yangtze River. *Water Research*, 168, doi.org/10.1016/j.watres.2019.115132.

- [6] Gad, M., & El-Hattab, M. (2019). Integration of water pollution indices and DRASTIC model for assessment of groundwater quality in El Fayoum depression, western desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 158, doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103554.
- [7] Kim, J.H., Shin, J.K., Lee, H., Lee, D. H., Kyung, K., Cho, H., Lee, Y.G. et al. (2021). Improving the performance of machine learning models for early warning of harmful algal blooms using an adaptive synthetic sampling method, *Water Research*, 207, 117821, doi.org/10.1016/j.watres.2021.117821.
- [8] Podlasek, A., Koda, E., Markiewicz, A., & Osinski, P. (2019). Identification of Processes and Migration Parameters for Conservative and Reactive Contaminants in the Soil-Water Environment: Towards a Sustainable Geoenvironment. *ICEG 2018: Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Geotechnics, 1*, 551–559. doi: 10.1007/978-981-13-2221-1_60
- [9] Grinberga, L., Grabuža, D., Grinfelde, I., Lauva, D., Celms, A.; Sas, W., Gluchowski, A., et al. (2021). Analysis of the Removal of BOD₅, COD and Suspended Solids in Subsurface Flow Constructed Wetland in Latvia. *Acta Sci. Polonorum. Archit.* 20. 8. doi:10.22630/ASPA.2021.20.4.31
- [10] 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
- [11] Shwetank, Suhas, & Chaudhary, J.K. (2020). A Comparative Study of Fuzzy Logic and WQI for Groundwater Quality Assessment. *Procedia Comput. Sci.*, 171, P. 1194–1203. doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.128
- [12] Pandey, R., & Pattanaik, L.A. (2014). Fuzzy QFD Approach to Implement Reverse Engineering in Prosthetic Socket Development. *Int. J. Ind. Syst. Eng.* 17. P.1–14. doi:10.1504/IJISE.2014.060819
- [13] Bezsonnyi, V., Tretyakov O., Ponomarenko R., Borodych, P., Burmenko O., & Karpets, K. (2021). Environmental risk assessment due to the impact of communal facilities on surface waters. *Problems of Emergency Situations*. 2(34), 58 – 76. doi.org/10.52363/2524-0226-2021-34-5
- [14] Bezsonnyi V., Tretyakov O., Ponomarenko R., Kalda G., & Asotskyi V. (2021). 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
- [15] 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. *Groundw. Sustain. Dev.* 9. 100245. doi:10.1016/j.gsd.2019.100245
- [16] Li, R., Zou, Z., & An, Y. (2016). Water Quality Assessment in Qu River Based on Fuzzy Water Pollution Index Method. *J. Environ. Sci.* 50. 87–92. doi:10.1016/j.jes.2016.03.030
- [17] Rezaei, A., Hassani, H., Hayati, M., Jabbari, N., & Barzegar, R. (2018). Risk Assessment and Ranking of Heavy Metals Concentration in Iran's Rayen Groundwater Basin Using Linear Assignment Method. *Stoch Environ. Res. Risk Assess.* 32. 1317–1336. doi: 10.1007/s00477-017-1477-x
- [18] Chapman, D.V. (1996). *Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring*. Cambridge, Great Britain, University Press. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/41850>
- [19] Cao, T.S., Nguyen, T.H.G., Trieu, P.T., Nguyen, H.N., Nguyen, T.L., & Vo, H.C. (2020). Assessment of Cau River water quality assessment using a combination of water quality and pollution indices. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua.*, 69 (2): 160–172. doi.org/10.2166/aqua.2020.122
- [20] Podgorski, J., & Berg, M. (2022). Global analysis and prediction of fluoride in groundwater. *Nature Communications*, 13(1). 4232 doi: 10.1038/s41467-022-31940-x
- [21] Chow, C. (2005). Potable Water. Water Analysis. *Encyclopedia of Analytical Science (Second Edition)*, 253-262. doi. org/10.1016/B0-12-369397-7/00654-3
- [22] Simonyan, G. (2020). Systemic-Entropic Approach for Assessing Water Quality of Rivers, Reservoirs, and Lakes. *Inland Waters – Dynamics and Ecology*. doi.org/10.5772/intechopen.93220
- [23] Simonyan, G.; & Pirumyan, G. (2019) Entropy – System Approach to Assess the Ecological Status of Reservoirs in Armenia. *Preprints*, 2019010260. doi.org/10.20944/preprints201901.0260.v1.
- [24] Ashby, W. (1959). *Introduction to cybernetics*. M.: IL.
- [25] Shannon, C. (1963) *Works on information theory and cybernetics*. M.: IL.
- [26] MacArthur, R.M. (1955) Fluctuation of animal populations and measure of community stability. *Ecology*. 36. 3. 533-536.
- [27] Margalef, R. (1958) Information theory in ecology. *Gen. Syst.* 3. 36.
- [28] Yatsyk, A. V. (2008). Kakhov's'ke vodokhovyshe [Kakhov Reservoir], Entsyklopediya Suchasnoyi Ukrayiny (8) [Encyclopedia of Modern Ukraine (8)]. *esu.com.ua*. Retrieved from: <https://esu.com.ua/article-11146> [in Ukrainian]
- [29] DSTU 4808:2007, (2007). Dzherela tsentralizovanoho pytnoho vodopostachannya. Hihiyenichni ta ekolohichni vymohy shchodo ekolohichnoho stanu poverkhnelykh vod i pravyla vybyrannya [Sources of centralized drinking water supply. Hygienic and ecological requirements for water quality and selection rules] online.budstandart.com Retrieved from: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=53159 [in Ukrainian]
- [30] Nekos, A., Boiaryn M., Tsos, O., Lugowska, M., & Netrobchuk, I. (2021). Assessment of the ecological condition of the Western Bug river basin according to the macrophyte index for rivers (MIR). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series “Geology. Geography. Ecology*. 54. 316-328. doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-24
- [31] Bezsonnyi, V. L., Tretyakov, O. V., Plyatsuk, L. D., & Nekos, A. N. (2022). 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. doi.org/10.26565/1992-4259-2022-27-01 [in Ukrainian]

- [32] Tretyakov, O., Shevchenko, T., Bezsonnyi, V. (2015). Improving the environmental safety of drinking water supply in kharkiv region (Ukraine). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10(77)), 40–49. doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51398

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Lan, J., Wang, T., Chawchai, S., Cheng, P., Zhou, K., Yu, K., Yan, D. et al. (2020). Time marker of ¹³⁷Cs fallout maximum in lake sediments of Northwest China *Quaternary Science Reviews*, 241, doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106413.
- [2] Massoud, M. (2012). Assessment of water quality along a recreational section of the Damour River in Lebanon using the water quality index. *Environ. Monit. Assess.*, 184, 4151–4160, doi:10.1007/s10661-011-2251-z.
- [3] Lyu, H.M., Shen, S.L., & Zhou A. (2021). The development of IFN-SPA: A new risk assessment method of urban water quality and its application in Shanghai. *Journal of Cleaner Production*, 282, doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124542.
- [4] Alver, A. (2019). Evaluation of conventional drinking water treatment plant efficiency according to water quality index and health risk assessment. *Environ Sci Pollut Res*, 26, 27225–27238. doi.org/10.1007/s11356-019-05801-y
- [5] Liu, D., Du, Y., Yu, S., Luo, J., & Duan, H. (2020) Human activities determine quantity and composition of dissolved organic matter in lakes along the Yangtze River. *Water Research*, 168, doi.org/10.1016/j.watres.2019.115132.
- [6] Gad, M., & El-Hattab, M. (2019). Integration of water pollution indices and DRASTIC model for assessment of groundwater quality in El Fayoum depression, western desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 158, doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103554.
- [7] Kim, J.H., Shin, J.K., Lee, H., Lee, D. H., Kyung, K., Cho, H., Lee, Y.G. et al. (2021). Improving the performance of machine learning models for early warning of harmful algal blooms using an adaptive synthetic sampling method, *Water Research*, 207, 117821, doi.org/10.1016/j.watres.2021.117821.
- [8] Podlasek, A., Koda, E., Markiewicz, A., & Osinski, P. (2019). Identification of Processes and Migration Parameters for Conservative and Reactive Contaminants in the Soil-Water Environment: Towards a Sustainable Geoenvironment. *ICEG 2018: Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Geotechnics, 1*, 551–559. doi: 10.1007/978-981-13-2221-1_60
- [9] Grinberga, L., Grabuža, D., Grinfelde, I., Lauva, D., Celms, A.; Sas, W., Gluchowski, A., et al. (2021). Analysis of the Removal of BOD₅, COD and Suspended Solids in Subsurface Flow Constructed Wetland in Latvia. *Acta Sci. Polonorum. Archit.* 20. 8. doi:10.22630/ASPA.2021.20.4.31
- [10] 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
- [11] Shwetank, Suhas, & Chaudhary, J.K. (2020). A Comparative Study of Fuzzy Logic and WQI for Groundwater Quality Assessment. *Procedia Comput. Sci.*, 171, P. 1194–1203. doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.128
- [12] Pandey, R., & Pattanaik, L.A. (2014). Fuzzy QFD Approach to Implement Reverse Engineering in Prosthetic Socket Development. *Int. J. Ind. Syst. Eng.* 17. P.1–14. doi:10.1504/IJISE.2014.060819
- [13] Безсонний, В. Л., Пономаренко, Р. В., Третяков, О. В., Бурменко, О. А., Бородич, П. Ю., & Карпец, К. М. Оцінка екологічного ризику внаслідок впливу комунальних об'єктів на поверхневі води. *Проблеми надзвичайних ситуацій*, 10(2/2021), 75–83. doi: 10.52363/2522-1892.2021.2.12
- [14] Безсонний, В. Л., Пономаренко, Р. В., Третяков, О. В., Калда, Г. С., & Асоцький В. В. (2021). Моніторинг екологічної безпеки водотоків за кисневими показниками. *Техногенно-екологічна безпека*, 10(2/2021), 75–83. doi: 10.52363/2522-1892.2021.2.12
- [15] 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. *Groundw. Sustain. Dev.* 9. 100245. doi:10.1016/j.gsd.2019.100245
- [16] Li, R., Zou, Z., & An, Y. (2016). Water Quality Assessment in Qu River Based on Fuzzy Water Pollution Index Method. *J. Environ. Sci.* 50. 87–92. doi:10.1016/j.jes.2016.03.030
- [17] Rezaei, A., Hassani, H., Hayati, M., Jabbari, N., & Barzegar, R. (2018). Risk Assessment and Ranking of Heavy Metals Concentration in Iran's Rayen Groundwater Basin Using Linear Assignment Method. *Stoch Environ. Res. Risk Assess.* 32. 1317–1336. doi: 10.1007/s00477-017-1477-x
- [18] Chapman, D.V. (1996). *Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring*. Cambridge, Great Britain, University Press. https://apps.who.int/iris/handle/10665/41850
- [19] Cao, T.S., Nguyen, T.H.G., Trieu, P.T., Nguyen, H.N., Nguyen, T.L., & Vo, H.C. (2020). Assessment of Cau River water quality assessment using a combination of water quality and pollution indices. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua.*, 69 (2): 160–172. doi.org/10.2166/aqua.2020.122
- [20] Podgorski, J., & Berg, M. (2022). Global analysis and prediction of fluoride in groundwater. *Nature Communications*, 13(1). Article number: 4232 doi: 10.1038/s41467-022-31940-x
- [21] Chow, C. (2005). Potable Water. Water Analysis. *Encyclopedia of Analytical Science (Second Edition)*, 253-262. doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00654-3

- [22] Simonyan, G. (2020). Systemic-Entropic Approach for Assessing Water Quality of Rivers, Reservoirs, and Lakes. *Inland Waters – Dynamics and Ecology*. doi.org/10.5772/intechopen.93220
- [23] Simonyan, G.; & Pirumyan, G. (2019) Entropy – System Approach to Assess the Ecological Status of Reservoirs in Armenia. *Preprints*, 2019010260. <https://doi.org/10.20944/preprints201901.0260.v1>.
- [24] Ashby, W. (1959). *Introduction to cybernetics*. M.: IL.
- [25] Shannon, C. (1963) *Works on information theory and cybernetics*. M.: IL.
- [26] MacArthur, R.M. (1955) Fluctuation of animal populations and measure of community stability. *Ecology*. 36. 3. 533-536.
- [27] Margalef, R. (1958) Information theory in ecology. *Gen. Syst.* 3. 36.
- [28] Yatsyk, A. V. (2008). Kakhov's'ke vodoshkovyshche [Kakhov Reservoir], *Entsyklopediya Suchasnoyi Ukrainy* (T. 8) [Encyclopedia of Modern Ukraine (Vol. 8)]. *esu.com.ua*. Retrieved from: <https://esu.com.ua/article-11146> [in Ukrainian]
- [29] ДСТУ 4808:2007, (2007). Джерела централізованого питного водопостачання. Гігієнічні та екологічні вимоги щодо якості води і правила вибирання online.budstandart.com Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=53159
- [30] Nekos, A., Boiaryn M., Tsos, O., Lugowska, M., & Netrobchuk, I. (2021). Assessment of the ecological condition of the Western Bug river basin according to the macrophyte index for rivers (MIR). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*. 54. 316-328. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-24>
- [31] Безсонний, В. Л., Третьяков, О. В., Пляцук, Л. Д., & Некос, А. Н. (2022) Ентропійний підхід до оцінки екологічного стану водотоку. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія»*. 27. 6 – 19. doi.org/10.26565/1992-4259-2022-27-01
- [32] Третьяков, О. В., Шевченко, Т. О., & Безсонний, В. Л. (2015). Підвищення рівня екологічної безпеки питного водопостачання Харківського регіону (Україна). *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 5(10(77)), 40–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51398>

© В. Л. Безсонний, Л. Д. Пляцук, О. В. Третьяков

Дата надходження статті до редакції: 30.03.2023

Дата затвердження статті до друку: 10.04.2023