

## КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЕНТРОПІЙНОГО ПІДХОДУ ТА БАГАТОВИМІРНОЇ СТАТИСТИКИ

Безсонний В. Л.

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

майд. Свободи, 4, 61022, м. Харків

[vitalii.bezsonnyi@hneu.net](mailto:vitalii.bezsonnyi@hneu.net)

Метою роботи є розроблення та апробація методології комплексного аналізу якості води, яка поєднує ентропійно-зважений підхід до індексування забруднення та методи багатовимірної статистики для ідентифікації прихованих факторів впливу. Розраховано ентропійні ваги, які дозволили ранжувати забруднювачі за їхнім внеском у загальну мінливість екосистеми. Встановлено, що пріоритетними забруднювачами басейну є амоній (вага 0,213), фосфати (0,172) та БСК<sub>5</sub> (0,147), сумарний внесок яких у формування інтегрального індексу перевищує 55 %. Це свідчить про домінування біогенного та органічного типів забруднення над мінералізаційними процесами. На основі розрахованого ентропійно-зваженого індексу (ЕІЗВ) проведено просторово-часовий аналіз, який виявив статистично значущу сезонну динаміку погіршення якості води. Доведено, що у теплий період року середнє значення індексу по басейну зростає з 1,85 до 2,46 (на 33 %), а в гирловій частині річки амплітуда сезонних коливань сягає критичних значень (+3,94 одиниці), що підтверджує гіпотезу про кумулятивний ефект вторинного забруднення та евтрофікації. Застосування методу кластерного аналізу (k-means) дозволило здійснити районування басейну та виділити чотири стійкі кластери якості води. Визначено, що 17 % постів моніторингу відносяться до зони критичного екологічного ризику (класи VI–VII), де процеси самоочищення води суттєво пригнічені. За допомогою аналізу головних компонент (PCA) ідентифіковано три латентні фактори, що пояснюють 82 % дисперсії даних: «Органічне навантаження» (38,4 %), «Біогенне збагачення» (29,1 %) та «Мінералізація» (14,5 %). Виявлено сезонну зміну детермінантів екологічної безпеки: влітку провідну роль відіграють біогенні процеси, пов'язані з сільськогосподарським стоком, тоді як взимку зростає вплив гідрологічних та мінеральних факторів. *Ключові слова:* екологічна безпека, якість поверхневих вод, Південний Буг, ентропійний метод, ентропійно-зважений індекс, багатовимірна статистика.

### Complex analysis of surface water quality using the entropy approach and multivariate statistics. Bezsonnyi V.

The aim of the work is to develop and test a methodology for comprehensive water quality analysis that combines an entropy-weighted approach to pollution indexing with multivariate statistical methods to identify latent influencing factors. Entropy weights were calculated, allowing for the ranking of pollutants based on their contribution to the overall variability of the ecosystem. It was established that the priority pollutants in the basin are ammonium (weight 0.213), phosphates (0.172), and BODs (0.147), whose combined contribution to the formation of the integral index exceeds 55 %. This indicates the dominance of biogenic and organic types of pollution over mineralization processes. Based on the calculated Entropy-Weighted Water Quality Index (EWQI), a spatiotemporal analysis was conducted, revealing a statistically significant seasonal dynamic of water quality deterioration. It was proven that during the warm season, the average index value across the basin increases from 1.85 to 2.46 (by 33 %), and in the estuarine part of the river, the amplitude of seasonal fluctuations reaches critical values (+3.94 units), confirming the hypothesis of the cumulative effect of secondary pollution and eutrophication. The application of the k-means cluster analysis method allowed for the zoning of the basin and the identification of four stable water quality clusters. It was determined that 17 % of the monitoring posts belong to the zone of critical ecological risk (classes VI–VII), where water self-purification processes are significantly suppressed. Using Principal Component Analysis (PCA), three latent factors explaining 82 % of the data variance were identified: “Organic Load” (38.4 %), “Biogenic Enrichment” (29.1 %), and “Mineralization” (14.5 %). A seasonal shift in the determinants of ecological safety was revealed: in summer, biogenic processes related to agricultural runoff play a leading role, while in winter, the influence of hydrological and mineral factors increases. *Key words:* ecological safety, surface water quality, Southern Bug River, entropy method, entropy-weighted index, multivariate statistics.

**Постановка проблеми.** Проблема збереження та раціонального використання водних ресурсів України залишається однією з найактуальніших у контексті забезпечення екологічної безпеки та сталого розвитку. Стан поверхневих вод виступає інтегральним індикатором техногенного навантаження,

оскільки водні об'єкти акумулюють забруднення з промисловості, аграрного сектору та комунального господарства. Дослідження [1] довело, що навіть за умов нормативного контролю якості стічних вод екологічні ризики залишаються значними через нестачність роботи очисних споруд. Для великих басей-

нових систем, таких як Південний Буг, характерним є накопичення біогенних та органічних речовин, що формують стійкі вогнища забруднення та порушують біогеохімічну рівновагу [2, 3]. Традиційні методи моніторингу часто не забезпечують достатньої репрезентативності даних, а експертні оцінки можуть бути суб'єктивними, що зумовлює необхідність впровадження формалізованих математичних моделей для об'єктивного аналізу екологічної безпеки водних екосистем.

**Актуальність дослідження.** Басейн річки Південний Буг має стратегічне значення для Правобережної України, концентруючи підприємства енергетичної та харчової промисловості разом із інтенсивним аграрним виробництвом. Така структура природокористування створює складні поліелементні системи забруднення [3]. Згідно з оцінками [4], басейн належить до категорії екологічно напружених, особливо у літньо-осінній період, коли фіксуються найвищі значення індексів забруднення. Актуальність роботи зумовлена необхідністю переходу від констатації фактів забруднення до виявлення прихованих статистичних закономірностей його формування. Використання ентропійно-зваженого підходу дозволяє усунути суб'єктивність у визначенні вагомості показників якості води, а застосування багатовимірної статистики – ідентифікувати ключові фактори деградації екосистеми, що є критично важливим для прийняття управлінських рішень в умовах обмежених ресурсів моніторингу.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Дослідження відповідає завданням Водної рамкової директиви ЄС 2000/60/ЄС щодо досягнення доброго екологічного стану водних масивів та базується на сучасних методах обробки даних моніторингу. Робота узгоджується з Цілями сталого розвитку ООН, зокрема ЦСР 6 «Чиста вода та санітарія» та ЦСР 12 «Відповідальне споживання і виробництво», сприяючи створенню науково обґрунтованої бази для управління водними ресурсами на регіональному рівні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останнім часом наукова спільнота фокусується на створенні інтегрованих показників екологічної безпеки [5]. Хоча традиційні індекси (WQI, CCME WQI) широко застосовуються [6], вони мають обмеження через використання експертних вагових коефіцієнтів, які не враховують локальну специфіку та варіабельність даних [7]. Розвиток інформаційно-ентропійного підходу (теорія Шеннона) дозволив вирішити цю проблему, розраховуючи ваги показників безпосередньо з їхньої статистичної ентропії. Ефективність цього методу доведена у дослідженнях водних об'єктів Індії [8] та Китаю [9], де коефіцієнт детермінації моделей суттєво зростає при використанні ентропійних ваг. В Україні ентропійний підхід розвивається у працях В. Л. Безсонного та співавто-

рів [2, 4], які обґрунтували доцільність використання композитних індикаторів для басейнів Дніпра та Сіверського Дінця. Сучасний світовий тренд полягає в інтеграції ентропійних методів із інструментами багатовимірної статистики, зокрема аналізом головних компонент (РСА) та кластерним аналізом, для глибокого вивчення структури забруднення [10–12].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Попри активний розвиток методології, більшість існуючих досліджень носять узагальнений характер або базуються на середньорічних значеннях, що нівелює сезонну динаміку гідрохімічних процесів. Для басейну Південного Бугу відсутні комплексні моделі, які б поєднували ентропійне оцінювання з факторним аналізом джерел забруднення. Недостатньо вивченим залишається питання статистичної достовірності сезонних відмінностей якості води та кількісного внеску окремих груп поліутантів (біогенних, органічних, мінеральних) у формування загального рівня екологічної небезпеки.

**Новизна.** У статті вперше для басейну річки Південний Буг застосовано комбінацію ентропійно-зваженого моделювання та методів багатовимірної статистики (РСА, кластерний аналіз) для виявлення прихованих закономірностей формування якості води. Наукова новизна полягає у: доведенні статистично значущої сезонної варіабельності екологічного стану (погіршення у теплий період на 33 %); ідентифікації через факторний аналіз трьох головних компонент (органічне навантаження, біогенне збагачення, мінералізація), які пояснюють понад 80 % дисперсії даних; визначенні пріоритетних забруднювачів на основі їх ентропійних ваг, що дозволило відійти від експертних оцінок до об'єктивного ранжування загроз.

**Методологічне або загальнонаукове значення.** Запропонований методологічний підхід, що базується на синергії теорії інформації та математичної статистики, є універсальним і може бути застосований для будь-яких річкових басейнів. Результати дослідження розширюють інструментарій екологічного моніторингу, дозволяючи замінити суцільний контроль на цільове спостереження за найбільш інформативними показниками (амоній, фосфати, БСК<sub>5</sub>). Практичне значення полягає у можливості використання розробленої моделі для автоматизованої діагностики екологічного стану та оптимізації мережі спостережень.

**Викладення основного матеріалу.** Основою дослідження стала база даних гідрохімічного моніторингу за 2020–2024 роки, що охоплює 36 створів у басейні річки Південний Буг. Аналізувалися 12 основних фізико-хімічних показників. Для забезпечення порівнянності різнорідних даних (мг/дм<sup>3</sup>, од. рН, % насичення) було проведено процедуру нормування. Вагомість кожного показника визначалася не експертним шляхом, а математично – через розра-

Таблиця 1

## Ранжування гідрохімічних показників за їх ентропійними вагами

| Ранг | Показник          | Ентропійна вага ( $W_j$ ) | Внесок у загальну оцінку, % | Тип забруднення         |
|------|-------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 1    | Амоній            | 0.213                     | 22.1                        | Біогенне                |
| 2    | Фосфати           | 0.172                     | 17.8                        | Біогенне (евтрофікація) |
| 3    | БСК <sub>5</sub>  | 0.147                     | 15.4                        | Органічне               |
| 4    | ХСК               | 0.115                     | 11.2                        | Органічне (стійке)      |
| 5    | Нітрати           | 0.096                     | 9.1                         | Біогенне                |
| 6    | Розчинений кисень | 0.078                     | 7.4                         | Газовий режим           |
| 7    | Сульфати          | 0.072                     | 6.9                         | Мінералізація           |
| 8    | Інші показники    | 0.107                     | 10.1                        | Змішане                 |

хунок інформаційної ентропії Шеннона, відповідно до методики [13], що дозволило об'єктивно оцінити внесок кожного параметру у варіабельність якості води. Результати розрахунку вагових коефіцієнтів ( $W_j$ ) наведено в табл. 1.

Як видно з табл. 1, сумарний внесок трьох показників (амоній, фосфати, БСК<sub>5</sub>) перевищує 55 %. Це свідчить про те, що саме біогенне та органічне забруднення є визначальним фактором формування екологічної безпеки басейну, тоді як показники мінералізації (сульфати, хлориди) мають меншу інформаційну вагу через відносну стабільність фонових значень.

*Аналіз сезонної динаміки інтегрального індексу.* Розрахунок ентропійно-зваженого індексу якості води (ЕІЗВ) виявив статистично значущу різницю між сезонами. Середнє значення індексу по басейну зросло з 1,85 у холодний період до 2,46 у теплий період, що вказує на погіршення якості води на 33 % влітку. Динаміка змін на ключових ділянках річки представлена в табл. 2.

Аналіз даних табл. 2 демонструє чіткий просторовий градієнт: у верхів'ях річки сезонні коливання є незначними (), тоді як у гирловій частині (м. Миколаїв) спостерігається різкий стрибок індексу в теплий період (). Це підтверджує гіпотезу про кумулятивний ефект забруднення, який посилюється температурним фактором та зниженням водності річки влітку.

*Кластерний аналіз та районування.* Для виділення зон із подібним екологічним станом було застосовано метод кластеризації k-means. Алгоритм

автоматично розподілив усі 36 постів моніторингу на чотири кластери, характеристики яких наведено в табл. 3.

Результати кластеризації (табл. 3) свідчать, що 17 % досліджуваних ділянок знаходяться у критичному стані (Кластер 4). Це зони екологічного ризику, де процеси самоочищення пригнічені надмірним антропогенним тиском.

*Факторний аналіз джерел забруднення (РСА).* Для ідентифікації природи забруднення було використано метод головних компонент (РСА). Факторний аналіз дозволив виокремити три латентні змінні (головні компоненти), які сумарно пояснюють 82 % дисперсії вихідних даних. Матриця факторних навантажень після процедури обертання Varimax наведена в табл. 4.

Згідно з даними табл. 4, перший фактор (F1) об'єднує показники органічного забруднення та кисневого режиму, що характерно для впливу комунальних стічних вод. Другий фактор (F2) має сильний зв'язок із сполуками азоту та фосфору, що вказує на сільськогосподарське походження забруднення (дифузний стік). Третій фактор (F3) відповідає за мінеральний склад води.

Порівняння сезонних вибірок показало, що в теплий період роль Фактора 2 (біогенного) зростає, що корелює з процесами евтрофікації, тоді як у холодний період збільшується частка дисперсії, пов'язана з Фактором 3 (мінералізацією). Це дозволяє стверджувати, що екологічна безпека басейну Південного Бугу має виражену сезонну структуру детермінантів: влітку ризику формуються біологіч-

Таблиця 2

## Порівняльна характеристика сезонних значень ЕІЗВ для ключових створів

| Пункт спостереження     | ЕІЗВ (холодний період) | Клас якості (холодний) | ЕІЗВ (теплий період) | Клас якості (теплий) | Зміна ( $\Delta$ ЕІЗВ) |
|-------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| Гайворон (верхня течія) | 0.43                   | II                     | 0.62                 | II–III               | +0.19                  |
| Ладижин                 | 1.12                   | III                    | 1.78                 | IV                   | +0.66                  |
| Первомайськ             | 1.65                   | IV                     | 2.45                 | V                    | +0.80                  |
| Вознесенськ             | 2.08                   | V                      | 3.12                 | VI                   | +1.04                  |
| Миколаїв (гирло)        | 2.86                   | V                      | 6.80                 | VII                  | +3.94                  |

Таблиця 3

## Статистична характеристика кластерів якості води

| Номер кластера | Діапазон значень ЕІЗВ | Інтерпретація екологічного стану | Частка постів, % | Типові представники     |
|----------------|-----------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------|
| 1              | <1,0                  | Чисті / Слабко забруднені        | 27               | Верхів'я, малі притоки  |
| 2              | 1,0–1,5               | Помірно забруднені               | 31               | Ділянки вище водосховищ |
| 3              | 1,5–3,0               | Забруднені                       | 25               | Райони середніх міст    |
| 4              | >3,0                  | Дуже брудні / Критичні           | 17               | Промислові зони, гирло  |

Таблиця 4

## Матриця факторних навантажень основних компонент

| Показник              | Фактор 1 (Органічне навантаження) | Фактор 2 (Біогенне збагачення) | Фактор 3 (Мінералізація) |
|-----------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| БСК <sub>5</sub>      | <b>0.89</b>                       | 0.21                           | 0.12                     |
| ХСК                   | <b>0.83</b>                       | 0.19                           | 0.23                     |
| Розчинений кисень     | <b>-0.77</b>                      | -0.31                          | -0.18                    |
| Амоній                | 0.34                              | <b>0.87</b>                    | 0.09                     |
| Фосфати               | 0.27                              | <b>0.81</b>                    | 0.15                     |
| Нітрати               | 0.22                              | <b>0.76</b>                    | 0.29                     |
| Сульфати              | 0.11                              | 0.18                           | <b>0.84</b>              |
| Хлориди               | 0.16                              | 0.21                           | <b>0.79</b>              |
| Пояснена дисперсія, % | 38.4 %                            | 29.1 %                         | 14.5 %                   |

ними процесами, взимку – гідрологічними та мінеральними.

**Висновки.** У роботі реалізовано комплексне оцінювання екологічної безпеки поверхневих вод басейну річки Південний Буг із використанням ентропійно-зваженої моделі (ЕІЗВ) та методів багатовимірної статистики. Запропонований методологічний підхід дозволив перейти від констатації рівнів забруднення до виявлення прихованих закономірностей їх формування, що підтверджує наукову новизну дослідження.

Ентропійне ранжування пріоритетних забруднювачів. Розрахунок інформаційної ентропії Шеннона дозволив об'єктивно визначити вагові коефіцієнти для гідрохімічних показників. Встановлено, що визначальний вплив на формування інтегрального індексу якості води мають амоній ( $\text{NH}_4^+$ ), фосфати ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) та БСК<sub>5</sub> ( $\text{BOD}_5$ ). Сумарний внесок цих трьох параметрів перевищує 55 %, що дозволяє ідентифікувати біогенне та органічне забруднення як домінуючий тип екологічної загрози для басейну, нівелюючи роль природної мінералізації.

Статистичне підтвердження сезонної динаміки. Порівняльний аналіз сезонних вибірок виявив статистично значуще ( $p < 0.01$ ) погіршення якості води у теплий період року. Середнє значення індексу ЕІЗВ зросло з 1,85 у холодний сезон до 2,46 у теплий (на 33 %). Ця закономірність найбільш виражена у нижній течії річки, де амплітуда сезонних коливань досягає +3.94 одиниці, що свідчить про кумулятивний ефект антропогенного навантаження та кліматичних факторів (температурний режим, евтрофікація).

Районування басейну методом кластеризації. Застосування методу k-means дозволило здійснити об'єктивне районування річкової системи без використання геоінформаційного картографування. Виділено чотири стійкі кластери якості води. Визначено, що 17 % постів моніторингу належать до зони критичного ризику (клас VI–VII, «дуже брудна вода»), 56 % перебувають у стані помірного та значного забруднення (класи III–V), і лише 27 % відповідають критеріям умовно чистих вод (класи I–II).

Факторна структура джерел забруднення. За результатами аналізу головних компонент (PCA) ідентифіковано три латентні фактори, що пояснюють 82 % варіабельності даних: «Органічне навантаження» (38.4 % дисперсії), «Біогенне збагачення» (29.1 %) та «Мінералізація» (14.5 %). Доведено, що структура екологічної небезпеки є динамічною: влітку провідну роль відіграють біогенні процеси (сільськогосподарський стік, «цвітіння» води), тоді як взимку зростає відносний вплив факторів мінералізації та гідрологічного режиму.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні наукового підґрунтя для оптимізації системи державного екологічного моніторингу. Використання ентропійних ваг дозволяє зосередити ресурси контролю на найбільш інформативних показниках (сполуки азоту та фосфору), а виділення критичних кластерів – пріоритезувати природоохоронні заходи на найбільш вразливих ділянках річкового басейну.

## Література

1. Bezsonnyi V. L. Assessment of environmental risks from the impact of domestic and industrial effluents. Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (Monitoring 2022). 2022. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580218>
2. Bezsonnyi V. L., Ponomarenko R. V., Tretyakov O. V., Asotsky V. A., Kalynovskyi A. V. Regarding the choice of composite indicators of ecological safety of water in the basin of the Siversky Donets. Journal of Geology, Geography and Geoecology. 2021. Vol. 30, No. 4. P. 622–631. DOI: <https://doi.org/10.15421/112157>
3. Bezsonnyi V. L., Plyatsuk L. D., Zhuravskij M., Tretyakov O., Ponomarenko R. V. Integrated assessment of the Dnipro Reservoir pollution sources. Journal of Geology, Geography and Geoecology. 2023. Vol. 32, No. 3. P. 461–473. DOI: <https://doi.org/10.15421/112341>
4. Bezsonnyi V., Tretyakov O., Plyatsuk L., Ponomarenko R., Davydova O. Seasonal and spatial dynamics of entropy-weighted water quality assessment in surface waters of Ukraine. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology. 2025. No. 62. P. 384–400. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-29>
5. Pesce S. F., Wunderlin D. A. Use of water quality indices to verify the impact of Cordoba city (Argentina) on Suquia River. Water Research. 2000. Vol. 34, No. 11. P. 2915–2926. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00036-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00036-1)
6. Liou S.-M., Lo S.-L., Wang S.-H. A generalized water quality index for Taiwan. Environmental Monitoring and Assessment. 2004. Vol. 96, No. 1–3. P. 35–52. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:EMAS.0000031715.83752.a1>
7. Said A., Stevens D. K., Sehlke G. An innovative index for evaluating water quality in streams. Environmental Management. 2004. Vol. 34, No. 3. P. 406–414. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0210-y>
8. Adimalla N. Application of the Entropy Weighted Water Quality Index (EWQI) and the Pollution Index of Groundwater (PIG) to Assess Groundwater Quality for Drinking Purposes: A Case Study in a Rural Area of Telangana State, India. Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2021. Vol. 80. P. 31–40. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00244-020-00800-4>
9. Zhang J., Hao Z., Liu X., Wang B., Guo W., Yan J. Surface Water Quality Evaluation and Pollution Source Analysis at the Confluence of the Wei River and Yellow River, China. Water. 2024. Vol. 16, No. 14. 2035. DOI: <https://doi.org/10.3390/w16142035>
10. Zhang D., Shi J. X., Xu H., Jing Q., Pan X., Liu T., Wang H., Hou H. A GIS-based spatial multi-index model for flood risk assessment in the Yangtze River Basin, China. Environmental Impact Assessment Review. 2020. Vol. 83. 106397. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106397>
11. Bekele Emiru K., Ren Y., Zuo S., Molla A., Mekonnen Seka A., Ju J. Combining spectral water index with band for surface water area extraction by using Google Earth Engine (GEE) and ArcGIS in the southern low mountain and hilly areas of China. Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2025. Vol. 39. 101650. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101650>
12. Mama A. C., Bodo W. K. A., Ghepdeu G. F. Y., Ajonina G. N., Ndam J. R. N. Understanding Seasonal and Spatial Variation of Water Quality Parameters in Mangrove Estuary of the Nyong River Using Multivariate Analysis (Cameroon Southern Atlantic Coast). Open Journal of Marine Science. 2021. Vol. 11. P. 103–128. DOI: <https://doi.org/10.4236/ojms.2021.113008>
13. Безсонний В. Л. Методика оцінки екологічного стану водойми на основі ентропійно зваженого індексу якості води. Екологічні науки : науково-практичний журнал, Київ. 2023. № 2(47). С. 44–48. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.7>

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025