**УДК 502.51:574.5/.6**
**https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202507-09**

# ОЦІНКА СТІЙКОСТІ ВОДНОЇ ЕКОСИСТЕМИ В НІЖНІЙ ЧАСТИНІ РІЧКИ ДНІПРО В СУЧАСНИХ УМОВАХ

**[1]Улицький О. А., [2]Д'яченко Н. О., [3]Пашкевич Л. П., [4]Головач А. Г.**
[1]ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»
пр. Академіка Палладіна, 34а, м. Київ, 03142
[2]ДУ «Науковий центр гірничої геології, геоекології та розвитку інфраструктури НАН України»,
б-р Вернадського, 34б, м. Київ, 03142
[3]Вінницький національний технічний університет,
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21000
[4]Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління,
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2, м. Київ, 03035
*olegulytsky@gmail.com,*
*natalidyachenko1969@gmail.com,*
*leonid@ukr.ua*
*garden129@ukr.net*

У роботі представлені результати аналізу стійкості водної екосистеми в ландшафтних районах Каховського водосховища (КВ) та нижньої течії річки Дніпро в умовах руйнування КВ з метою оцінки здатності природної водної екосистеми нижнього Дніпра до самовідновлення після антропогенного тиску.

Запропоновано авторами сучасний новітній підхід – оцінка стійкості екосистеми води річки Дніпро за допомогою метода комплексних індексів: евтрофікації (EI), якості води (WQI) та самоочищення (IS) та розрахунку показника екологічного резерву. Здійснення оцінки стійкості водної екосистеми нижнього Дніпра в сучасних умовах проведено з використанням даних моніторингу Державного агентства водних ресурсів України по постах на річці Дніпро в Запорізькій та Херсонській областях та річці Інгулець

Встановлено, що оцінка стійкості екосистеми нижнього Дніпра є складною багатофакторною задачею. Вона вимагає комплексного підходу, враховуючи різноманітні показники: гідрологічні, якості води, біорізноманіття та антропогенного впливу. За результатами проведеної оцінки стійкості екосистеми нижнього Дніпра, виявлено, що здатність до самоочищення річки Дніпро демонструє стійкість, але з певними коливаннями: розрахунок індексу самоочищення показав, що річка має досить високу здатність до самоочищення, але її показники залежать від сезону та кількості опадів. Розрахунок індексу евтрофікації вказує на помірний рівень евтрофікації, тобто на відносну стійкість екосистеми. Вплив фосфатів на евтрофікацію виявився слабкішим, ніж нітратів. Значення WQI біля Запоріжжя вказує на середню якість води та свідчить про задовільний її стан, але потребує постійного контролю. Отримані значення індексів та їх інтерпретацію слід розглядати як частину комплексної оцінки, а не як визначальний фактор.

**Ключові слова**: стійкість екосистеми, індекс самоочищення, Каховське водосховище, кореляція, екологічна безпека, рівень евтрофікаціїя.

**Assessment of the sustainability of the aquatic ecosystem in the lower part of the dnipro river in modern conditions**. *Ulytskyi O. Dyachenko N. Pashkevych Д. Holovach A.*

The paper presents the findings of an analysis of the aquatic ecosystem sustainability in the landscape areas of the Kakhovka Reservoir (KR) and the lower reaches of the Dnipro River in the context of the KR

destruction, with the aim of assessing the ability of the natural aquatic ecosystem of the lower Dnipro to recover from anthropogenic pressure.

A contemporary and pioneering approach is put forward: the assessment of the sustainability of the Dnipro river water ecosystem employing the method of complex indices (i.e. eutrophication (EI), water quality (WQI) and self-purification (IS)) and the calculation of the ecological reserve indicator. The assessment of the sustainability of the aquatic ecosystem of the lower Dnipro River in modern conditions was carried out using the monitoring data of the State Agency of Water Resources of Ukraine at the gauging stations on the Dnipro River in the Zaporizhzhia and Kherson regions and the Ingulets River.

The assessment of the sustainability of the Lower Dnipro ecosystem has been determined to be a complex multifactorial task. An integrated approach, encompassing hydrological, water quality, biodiversity and anthropogenic impact indicators, is imperative for its effective evaluation. The assessment of the Lower Dnipro ecosystem's sustainability revealed that the Dnipro River's self-purification capacity demonstrates stability, albeit with certain fluctuations. The calculation of the self-purification index demonstrated that the river has a fairly high self-purification capacity, yet its performance is contingent on the season and rainfall. The calculation of the eutrophication index indicates a moderate level of eutrophication, i.e. the relative stability of the ecosystem. The impact of phosphates on eutrophication was weaker than that of nitrates. The WQI value near Zaporizhzhia indicates an average water quality and indicates a satisfactory condition, but requires constant monitoring. The obtained values of the indices and their interpretation should be considered as part of a comprehensive assessment, not as a determining factor.

**Keywords**: ecosystem sustainability, self-purification index, Kakhovka reservoir, correlation, environmental safety, eutrophication level.

**Постановка проблеми**

Масштабні військові дії 2022-2025 роках проти України, нажаль, призвели до руйнування Каховського водосховища, що за думкою експертів, мало катастрофічні наслідки. Підрив дамби призвів до різкого падіння рівня води у Каховському водосховищі, що викликало: а) екологічну катастрофу затоплення значних територій нижче за течією Дніпра, загибель риби та інших водних організмів, забруднення води та ґрунтів. Це створило загрозу для екосистеми регіону на тривалий час, наслідки якої будуть відчуватися протягом багатьох років. Загальний масштаб катастрофи ще повністю не оцінений.

Виходячи з трактування терміну «екологічна безпека» як рівня захищеності життєво важливих інтересів людини, а також суспільства, довкілля від реальних або потенційних загроз, руйнування Каховської ГЕС стало однією з найбільших екологічних та гуманітарних катастроф в історії України. Саме тому, актуальність вивчення екологічних умов стійкості водної екосистеми нижньої течії Дніпра після руйнування Каховської ГЕС надзвичайно висока з кількох причин:

*По-перше*, це масштаб катастрофи. Руйнування дамби мало безпрецедентні наслідки для річкової екосистеми. Раптове вивільнення великого об'єму води, зміна гідрологічного режиму, забруднення води та ґрунту створили унікальну ситуацію, що потребує ретельного вивчення.

*По-друге*, це довготривалі наслідки. Вплив катастрофи можливо буде відчуватися протягом багатьох років. Вивчення динаміки відновлення екосистеми та тривалості процесу відновлення є критично важливим для прогнозування майбутнього стану річки Дніпро та інших водотоків. З цього випливає окрема позиція актуальності – це питання водопостачання та безпеки. Зміна екологічного стану р. Дніпро безпосередньо впливає на якість води, що використовується для споживання та інших побутових потреб населення. Дослідження допоможе в розробленні майбутніх ефективних заходів для забезпечення водопостачання та безпеки населення.

Під загрозою опинилося сільське господарство (СГ). Зміна гідрологічного режиму та якості води може негативно впливати на СГ в регіонах де вона протікає. Дослідження допоможе розробці стратегій адаптації його до нових умов. І на останок, результати досліджень будуть основою для прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо екологічної безпеки екосистеми нижньої течії Дніпра.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Стійкість природного середовища визначається як його властивість зберігати свою структуру і характер функціонування при зміні умов, викликаних зовнішнім впливом. За даними досліджень [1] поняття стійкості визначається низкою індексів, які характеризують різні показники. До таких показників належать сольовий, трофосапробіологічний склад і токсичність, екологічний резерв, ефективність механізму пластичного обміну хімічних сполук антропогенний вплив та екологічна ємність. Серед інших показників – асиміляційні потенціал та асиміляційна ємність, трофічний статус, коефіцієнт самооновлення води, порівняння показників з нормативними значеннями, рівні компенсаторного механізму біотичної саморегуляції води.

Загалом, стійкість екосистем є важливим індикатором стану довкілля. Загалом, це здатність екосистеми протистояти впливу зовнішніх факторів таким чином, щоб зберегти структурну цілісність та функціональні можливості. Вона може бути концептуалізована як внутрішня стабільність певного стану екосистеми, а також її здатність до переходу в будь-який інший стан у певний момент часу (статична стійкість) і безперервність розвитку екосистеми (динамічна стійкість). За даними [2], «принциповим у переході від розгляду технічної системи до розгляду екосистеми є те, що в останньої відхилення реальних траєкторій розвитку від траєкторії мети відбуваються випадково і отримати точну інформацію про ці відхилення неможливо. І якщо про стійкість технічної системи можна стверджувати однозначно, аналізуючи диференціальні рівняння, що характеризують поведінку системи, то здебільшого скласти диференціальні рівняння функціонування екосистеми неможливо. Тому висновки про стійкість або нестійкість екосистеми можна робити тільки з певною імовірністю». Автори наголошують, «що стійкість екосистем значною мірою визначається рівнем збалансованості розвитку її складових – екологічних підсистем». Тобто, стійкість водних екосистем можна розглядати як екологічну підсистему.

Здебільшого, потенціал стійкості природного середовища оцінюють за метеорологічним потенціалом атмосфери, потенціалами стійкості поверхневих вод, ґрунтів та біотичним потенціалом [3]. На ділянці нижньої течії р. Дніпра в період існування водосховищ природний потенціал самоочищення поверхневих вод, згідно з дослідженнями авторів роботи [4] мав досить високий (від 0,5 до 2) інтегральний показник.

Автори дослідження [5] вивчали питання: «який фактор рухає еволюцією екосистеми для відновлення». Для наукового розв'язання вчені висувають гіпотезу «екосистемного або ресурсного ядра», яке забезпечує основу (матерію та енергію) для існування та прогресу організмів і має бути ядром екосистеми. Дослідники стверджують, що введення штучної допоміжної енергії є прямою причиною еволюції екосистеми. При цьому, різні комбінації природної та набутої енергії об'єднуються для підтримання однієї й тієї самої екосистеми в різних умовах навколишнього середовища. Одна екосистема замінюється іншою екосистемою, що називається еволюцією. Сенс наведеної теорії полягає в тезі: екосистема – угруповання живих організмів у поєднанні з неживими компонентами їхнього середовища [6]. При цьому, для існування та розвитку організмів необхідні абіотичні компоненти світло, вода, повітря, ґрунт тощо. Органічна частина відноситься до взаємовідносин між організмами (рослини, тварини, мікроби), які поділяються на виробників, споживачів і редуцентів. Ці біотичні та абіотичні компоненти пов'язані між собою за допомогою колообігу матерії та потоку енергії [7]. Тобто, середовище визначає існування організмів. Однак, коли організми адаптуються до середовища, вони починають чинити перетворювальний вплив на навколишнє середовище. Інакше кажучи, абіотичний компонент екосистеми (ресурси) виступає в ролі ядра екосистеми або ядра ресурсів і забезпечує енергію для розвитку живих істот. Тому, в еволюції екосистеми різні екологічні чинники призводять до зміни структури та функцій системи, а зміна матерії та енергії є основними рушійними факторами. В той же час, стійкість екосистем розглядається як здатність зберігати свою структуру і характер функціонування в просторі та часі за впливу змін умов зовнішнього середовища. Оскільки, зруйноване Каховське водосховище (в певний відрізок часу), являло собою водну екосистему, тому при розгляді питання стійкості необхідно розглядати

поняття та значення стійкості водних екосистем як підґрунтя у вигляді абіотичної компоненти.

З погляду на вище означені тези, стійкість водних екосистем є важливим аспектом не тільки екології, який стосується здатності цих систем підтримувати свою структуру, функції та біорізноманіття під впливом природних і антропогенних змін, але й екологічної безпеки. Тому, у сучасних умовах, зважаючи на глобальні зміни клімату, забруднення води та антропогенні втручання, розуміння механізмів стійкості водних екосистем набуває особливої актуальності.

Існує багато чинників, що впливають на стійкість водних екосистем:

- *біорізноманіття:* багате видове різноманіття підвищує стійкість системи, оскільки кожен вид виконує свої функції та може заміщувати інші в умовах стресу.
- *гідрологічні умови:* стабільний гідрологічний режим (рівень води, температура та течія) є критичним для збереження екосистеми. Будь-які зміни можуть загрожувати стійкості.
- *забруднення:* викиди забруднюючих речовин можуть серйозно вплинути на якість води що, так само, може призвести до зниження біорізноманіття та функцій екосистеми.
- *кліматичні зміни:* зміни температури та режиму опадів можуть впливати на гідрологічний цикл і, відповідно, на здоров'я водних екосистем.

Але головне питання екологічної безпеки полягає в адаптація до змін. Створення стійких водних екосистем може допомогти екосистемам адаптуватися до змін, викликаних людиною і природою, зокрема до змін клімату.

В цьому сенсі, слід нагадати про дослідження, що пов'язані з таким терміном «екологічна пам'ять». Згідно з сучасними дослідженнями [8] вплив «екологічної пам'яті» на стійкість є різноманітний: залежно від часового масштабу, що розглядається, така пам'ять або прискорює, або сповільнює відновлення після збурень, таким чином підвищуючи (або знижуючи) стійкість відповідно. Довгострокова пам'ять може діяти на декількох часових шкалах через повільне (зазвичай, за степеневим законом) згасання впливу минулих станів. Крім того, в мультистабільних системах пам'ять підвищує стійкість, сприяючи збереженню початкового стабільного стану. Визначено, що екосистема проявляє екологічну пам'ять, коли майбутні стани залежать не тільки від поточного, а й від початкового стану та траєкторії [8]. Екологічна пам'ять стосується впливу минулих подій на реакцію екосистеми на екзогенні або ендогенні зміни. Вона визнана ключовим фактором динаміки екосистем та інших складних систем. Проте, кількісні моделі угруповань часто ігнорують пам'ять та її наслідки. Після припинення збурення пам'ять спочатку прискорює повернення до початкового стану, але потім уповільнює його на пізніх стадіях відновлення.

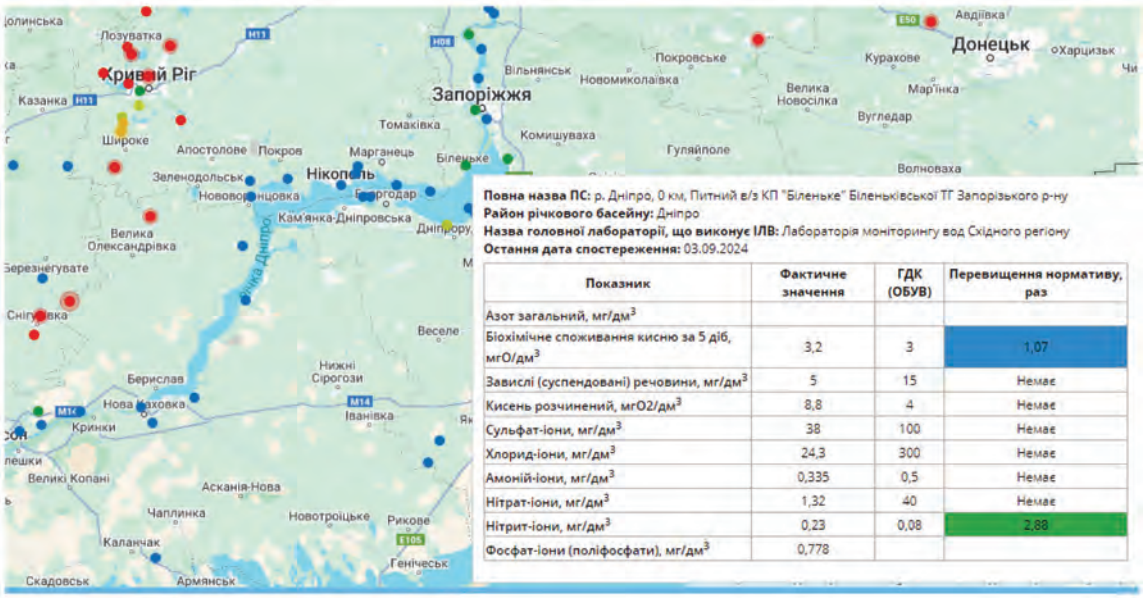
Проведений аналіз досліджень та публікацій свідчить, про різноманітність та багатокомпонентність підходів до оцінювання стійкості водних екосистем. Вони містять значну кількість показників, критеріїв та шкал. Вибір необхідних методологій залежить від особливостей водного об'єкту, що досліджується. Однак, інтегральні підходи найчастіше використовуються для відстеження певних закономірностей у підтримці стійкості, а також для виявлення, систематизації та визначення взаємозв'язків між компонентами водної екосистеми та факторами, що найбільше впливають на її стан. Саме тому, виникає необхідність оцінити умови стійкості водної екосистеми в ніжній частині річки Дніпро в умовах руйнування Каховського водосховища методами комплексних індексів [9].

**Мета роботи**

Оцінка потенціалу екологічної стійкості природної водної екосистеми нижнього Дніпра, тобто її здатність самовідновлюватися, в умовах антропогенного тиску руйнування Каховського водосховища.

**Результати дослідження**

Здійснення оцінки стійкості водної екосистеми нижнього Дніпра в сучасних умовах проведено з використанням даних моніторингу Державного агентства водних ресурсів України по постах на річки Дніпро в Запорізькій та Херсонській областях та річки Інгулець [9] (рис. 1, а; 2, а).



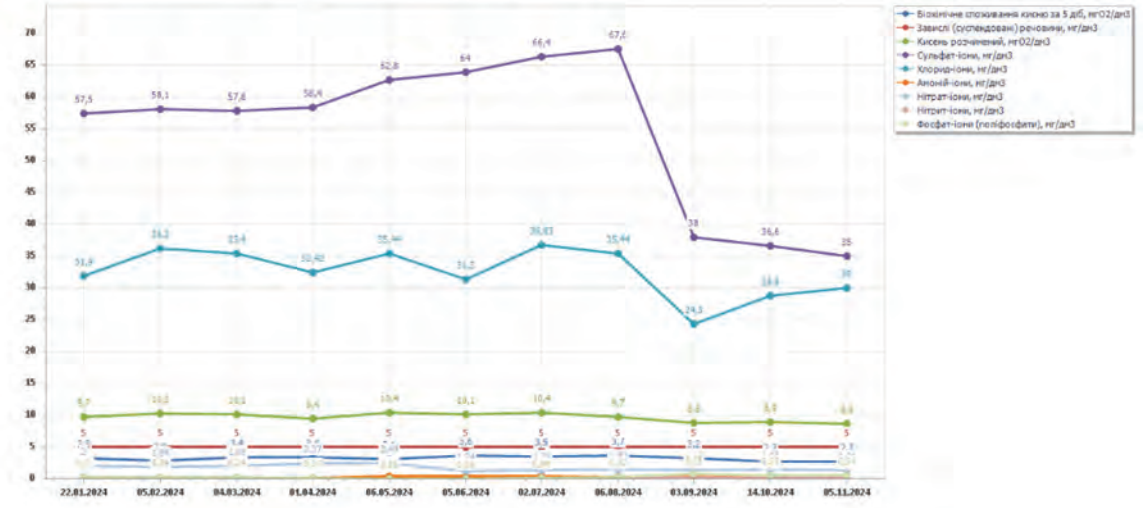

| Показник | Фактичне значення | ГДК (ОБУВ) | Перевищення нормативу, раз |
|---|---|---|---|
| Азот загальний, мг/дм³ | | | |
| Біохімічне споживання кисню за 5 діб, мгО/дм³ | 3,2 | 3 | 1,07 |
| Завислі (суспендовані) речовини, мг/дм³ | 5 | 15 | Немає |
| Кисень розчинений, мгО2/дм³ | 8,8 | 4 | Немає |
| Сульфат-іони, мг/дм³ | 38 | 100 | Немає |
| Хлорид-іони, мг/дм³ | 24,3 | 300 | Немає |
| Амоній-іони, мг/дм³ | 0,335 | 0,5 | Немає |
| Нітрат-іони, мг/дм³ | 1,32 | 40 | Немає |
| Нітрит-іони, мг/дм³ | 0,23 | 0,08 | 2,88 |
| Фосфат-іони (поліфосфати), мг/дм³ | 0,778 | | |

а)

По посту: р. Дніпро, 0 км, Питний в/з КП "Біленьке" Біленьківської ТГ Запорізького р-ну

Значення | Показники

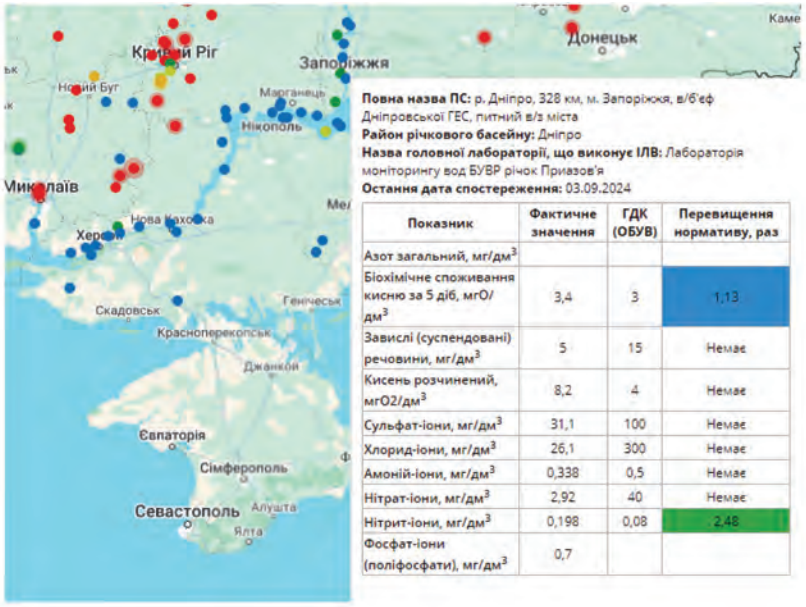
| Дата | Амоній-іони, мг/дм3 | Біохімічне споживання кисню за 5 діб, мгО2/дм3 | Завислі (суспендовані) речовини, мг/дм3 | Кисень розчинений, мгО2/дм3 | Нітрат-іони, мг/дм3 | Нітрит-іони, мг/дм3 | Сульфат-іони, мг/дм3 | Фосфат-іони (поліфосфати), мг/дм3 | Хлорид-іони, мг/дм3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 22.01.2024 | 0,12 | 3,30 | 5,00 | 9,70 | 2,00 | 0,06 | 57,50 | 0,30 | 31,90 |
| 05.02.2024 | 0,11 | 2,90 | 5,00 | 10,30 | 1,94 | 0,06 | 58,10 | 0,29 | 36,30 |
| 04.03.2024 | 0,08 | 3,40 | 5,00 | 10,10 | 1,98 | 0,05 | 57,30 | 0,29 | 35,40 |
| 01.04.2024 | 0,19 | 3,40 | 5,00 | 9,40 | 2,37 | 0,06 | 56,40 | 0,07 | 32,42 |
| 06.05.2024 | 0,43 | 3,10 | 5,00 | 10,40 | 2,49 | 0,05 | 62,80 | 0,05 | 35,44 |
| 05.06.2024 | 0,42 | 3,60 | 5,00 | 10,10 | 1,24 | 0,04 | 64,00 | 0,05 | 31,30 |
| 02.07.2024 | 0,35 | 3,50 | 5,00 | 10,40 | 1,29 | 0,10 | 66,40 | 0,08 | 36,83 |
| 06.08.2024 | 0,31 | 3,70 | 5,00 | 9,70 | 1,43 | 0,10 | 67,60 | 0,22 | 35,44 |
| 03.09.2024 | 0,34 | 3,20 | 5,00 | 8,80 | 1,32 | 0,23 | 38,00 | 0,78 | 24,30 |
| 14.10.2024 | 0,14 | 2,70 | 5,00 | 8,90 | 1,43 | 0,10 | 36,60 | 0,55 | 28,80 |
| 05.11.2024 | 0,17 | 2,70 | 5,00 | 8,60 | 1,34 | 0,10 | 35,00 | 0,54 | 30,00 |




б)

*Рисунок 1. Пост р. Дніпро, 0 км, Питний в/з КП «Біленьке» Біленьківської ТГ Запорізького р-ну: а – географічне розташування, б – данні моніторингу*

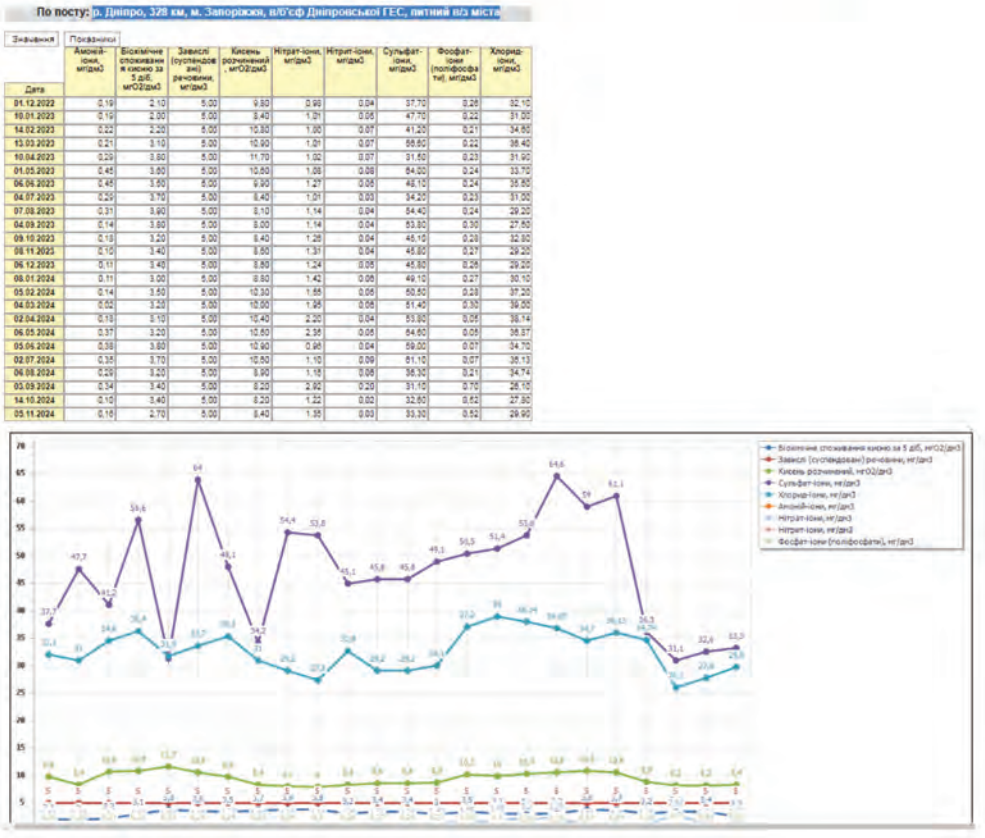
Розрахунок індексів якості води (WQI) або екологічної стійкості, трофічного стану та самоочищення для нижнього Дніпра вимагає використання даних про якісний стан води, таких як концентрація забруднювальних речовин, показники біологічної активності, гідрохімічні та гідробіологічні параметри. В дослідженні автори статті використали данні по двох постах спостереження р. Дніпро [10] (рис. 1, б; 2, б). Дані моніторингу по інших постах р. Дніпро не інформативні з точки зору кількості спостережень, тому вони не використовувались для аналізу.




**Повна назва ПС:** р. Дніпро, 328 км, м. Запоріжжя, в/б'єф Дніпровської ГЕС, питний в/з міста
**Район річкового басейну:** Дніпро
**Назва головної лабораторії, що виконує ІЛВ:** Лабораторія моніторингу вод БУВР річок Приазов'я
**Остання дата спостереження:** 03.09.2024

| Показник | Фактичне значення | ГДК (ОБУВ) | Перевищення нормативу, раз |
|---|---|---|---|
| Азот загальний, мг/дм³ | | | |
| Біохімічне споживання кисню за 5 діб, мгО/дм³ | 3,4 | 3 | 1,13 |
| Завислі (суспендовані) речовини, мг/дм³ | 5 | 15 | Немає |
| Кисень розчинений, мгО2/дм³ | 8,2 | 4 | Немає |
| Сульфат-іони, мг/дм³ | 31,1 | 100 | Немає |
| Хлорид-іони, мг/дм³ | 26,1 | 300 | Немає |
| Амоній-іони, мг/дм³ | 0,338 | 0,5 | Немає |
| Нітрат-іони, мг/дм³ | 2,92 | 40 | Немає |
| Нітрит-іони, мг/дм³ | 0,198 | 0,08 | 2,48 |
| Фосфат-іони (поліфосфати), мг/дм³ | 0,7 | | |

а)




| Дата | Амоній-іони, мг/дм3 | Біохімічне споживання кисню за 5 діб, мгО2/дм3 | Завислі (суспендовані) речовини, мг/дм3 | Кисень розчинений, мгО2/дм3 | Нітрат-іони, мг/дм3 | Нітрит-іони, мг/дм3 | Сульфат-іони, мг/дм3 | Фосфат-іони (поліфосфати), мг/дм3 | Хлорид-іони, мг/дм3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 01.12.2022 | 0.19 | 2.10 | 5.00 | 9.80 | 0.99 | 0.04 | 37.70 | 0.28 | 32.10 |
| 10.01.2023 | 0.19 | 2.00 | 5.00 | 8.40 | 1.01 | 0.05 | 47.70 | 0.22 | 31.00 |
| 14.02.2023 | 0.22 | 2.20 | 5.00 | 10.30 | 1.00 | 0.07 | 41.20 | 0.21 | 34.80 |
| 13.03.2023 | 0.21 | 3.10 | 5.00 | 10.90 | 1.01 | 0.07 | 56.60 | 0.22 | 38.40 |
| 10.04.2023 | 0.29 | 3.80 | 5.00 | 11.70 | 1.02 | 0.07 | 51.50 | 0.23 | 31.90 |
| 01.05.2023 | 0.45 | 3.60 | 5.00 | 10.60 | 1.08 | 0.08 | 64.00 | 0.24 | 33.70 |
| 06.06.2023 | 0.45 | 3.60 | 5.00 | 9.90 | 1.27 | 0.08 | 48.10 | 0.24 | 35.80 |
| 04.07.2023 | 0.29 | 3.70 | 5.00 | 8.40 | 1.01 | 0.03 | 34.20 | 0.23 | 31.00 |
| 07.08.2023 | 0.31 | 3.90 | 5.00 | 8.10 | 1.14 | 0.04 | 54.40 | 0.24 | 29.20 |
| 04.09.2023 | 0.14 | 3.80 | 5.00 | 9.00 | 1.14 | 0.04 | 53.80 | 0.30 | 27.60 |
| 09.10.2023 | 0.18 | 3.20 | 5.00 | 8.40 | 1.28 | 0.04 | 46.10 | 0.28 | 32.80 |
| 08.11.2023 | 0.10 | 3.40 | 5.00 | 8.50 | 1.31 | 0.04 | 45.80 | 0.27 | 29.20 |
| 06.12.2023 | 0.11 | 3.40 | 5.00 | 8.80 | 1.24 | 0.05 | 45.80 | 0.26 | 29.20 |
| 08.01.2024 | 0.11 | 3.00 | 5.00 | 8.80 | 1.42 | 0.06 | 49.10 | 0.27 | 30.10 |
| 05.02.2024 | 0.14 | 3.60 | 5.00 | 10.30 | 1.55 | 0.06 | 50.50 | 0.28 | 37.20 |
| 04.03.2024 | 0.02 | 3.20 | 5.00 | 10.00 | 1.95 | 0.06 | 51.40 | 0.30 | 39.00 |
| 02.04.2024 | 0.13 | 3.10 | 5.00 | 10.40 | 2.20 | 0.04 | 53.80 | 0.26 | 36.74 |
| 06.05.2024 | 0.37 | 3.20 | 5.00 | 10.60 | 2.36 | 0.05 | 54.60 | 0.26 | 36.37 |
| 05.06.2024 | 0.38 | 3.80 | 5.00 | 10.90 | 0.96 | 0.04 | 59.00 | 0.27 | 34.70 |
| 02.07.2024 | 0.36 | 3.70 | 5.00 | 10.50 | 1.10 | 0.09 | 61.10 | 0.27 | 36.13 |
| 06.08.2024 | 0.29 | 3.20 | 5.00 | 9.90 | 1.15 | 0.06 | 56.30 | 0.21 | 34.74 |
| 03.09.2024 | 0.34 | 3.40 | 5.00 | 8.20 | 2.92 | 0.20 | 31.10 | 0.70 | 26.10 |
| 14.10.2024 | 0.10 | 3.40 | 5.00 | 8.20 | 1.22 | 0.02 | 32.60 | 0.62 | 27.30 |
| 05.11.2024 | 0.18 | 2.70 | 5.00 | 8.40 | 1.38 | 0.03 | 33.30 | 0.52 | 29.90 |

б)

*Рисунок 1. Моніторинг за даними поста спостереження. Пост р. Дніпро, 328 км, м. Запоріжжя, в/б'єф Дніпровської ГЕС: а – географічне розташування, б – данні моніторингу*

Для оцінки стійкості водної екосистеми нижнього Дніпра по даних поста р. Дніпро, 0 км, Питний в/з КП «Біленьке» Біленьківської ТГ Запорізького р-ну (табл. 1), розраховано індекс самоочищення (індекс розкладання) IS, який характеризує здатність водного об'єкту до природного відновлення та враховує наступні першочергові показники забруднення водойм: кисень розчинений, мг$O_2$/дм³ ($O_2$); біохімічне споживання кисню за 5 діб, мг$O_2$/дм³ (БСК$_5$).

Формула для розрахунку IS має вигляд:

$$IS = \frac{(O2)}{(БСК5)}$$

Динамічна характеристика зміни індексу самоочищення з часом має наступний графічний вигляд (рис. 3).

Вищий показник IS свідчить про більшу здатність річки до самоочищення. При цьому, графік індексу самоочищення показує, що: у першій частині графіка (вимірювання січень квітень 2024 р.) значення IS дещо коливаються. Вже з травня є підйоми і невеликі спадання, які можуть вказувати на локальні фактори (зміна руху течії, збільшення або зменшення температури); найнижче значення у вимірюванні було у серпні (2,622), а найвище, у лютому (3,552).

З точки зору тенденцій, варто звернути увагу на виявлений підйом наприкінці графіка (вимірювання у серпні). Збільшення кількості опадів посприяло збільшенню значення індексу. І навпаки, засушливе літо сприяє зниженню показника. Підвищення БСК$_5$ знижає значення IS, тобто збільшується рівень забруднення. Кореляція між БСК$_5$ та IS достатньо висока та від'ємна, коефіцієнт кореляції (Ккор) дорівнює – 0,779. Збільшення [$O_2$] за рахунок аерації практично не впливає на самоочищення, тому маємо статистично низький Ккор (0,170603). Ккор між БСК5 та [$O_2$] дорівнює 0,481.

Це вказує на слабку позитивну кореляцію, а саме: коли значення БСК$_5$ зростають, рівень розчиненого кисню [$O_2$] теж має тенденцію к зростанню. Лінійний тренд кривої індексу самоочищення має наступні риси: нахил лінії тренду – 0,0102, що свідчить про відносно незначний спад індексу самоочищення. Дуже низький коефіцієнт $R^2$ = 0,0135 вказує на те, що лінійна модель тренду не описує зміну індексу та не статистично значуща.

В загальному вигляді, аналіз даних моніторингу, свідчить про те, що здатність річки до самоочищення близька до постійної, маючи незначні коливання залежно від повені. Середній показник індексу самоочищення дорівнює 3,02, що вказує на хорошу якість води та високу здатність річки до природного самовідновлення.

*Таблиця 1*

**Показники параметрів та результат IS**

| Дата | 01.24 | 02.24 | 03.24 | 04.24 | 05.24 | 06.24 | 07.24 | 08.24 | 09.24 | 10.24 | 11.24 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| БСК5 | 3.3 | 2.9 | 3.4 | 3.4 | 3.1 | 3.6 | 3.5 | 3.7 | 3.2 | 2.7 | 2.7 |
| $O_2$ | 9.7 | 10.3 | 10.1 | 9.4 | 10.4 | 10.1 | 10.4 | 9.7 | 8.8 | 8.9 | 8.6 |
| IS | 2,939 | 3,552 | 2,971 | 2,765 | 3,355 | 2,806 | 2,971 | 2,622 | 2,75 | 3,296 | 3,185 |

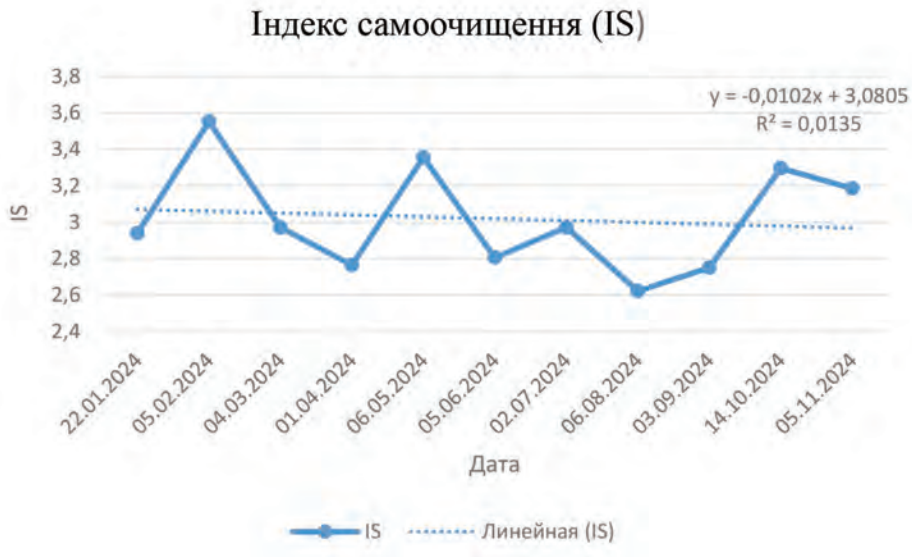



*Рисунок 3. Динамічна характеристика зміни індексу самоочищення з часом*

Наступний індекс, який був розрахований по посту р. Дніпро, 0 км, Питний в/з КП «Біленьке» Біленьківської ТГ Запорізького р-ну, це індекс евтрофікації (EI) з використанням формули:

$$EI = \frac{(NO3 + PO4)}{2}$$

Для розрахунку використані дані (табл. 2) концентрації азоту у вигляді нітратів ($NO_3$-, мг/дм³) та концентрація фосфору у вигляді ортофосфатів ($PO_4$-, мг/дм³).

Динамічна характеристика зміни індексу евтрофікації з часом, має графічний вигляд (рис. 4).

Значення Ккор між показниками EI та нітрат іонами дуже високий та дорівнює 0,853, але Ккор між EI та фосфат іонами дуже низький – 0,108. Тобто, EI зростає зі збільшенням нітрат іонів, що свідчить про те, що чим менше нітратів, тим більше сприятливими є тенденції стійкості. Тим часом, Ккор між двома масивами фосфат та нітрат іонів – від'ємний (–0,427), що свідчить про слабку обернено пропорційну залежність.

Стійкість екосистеми води за значенням індексу евтрофікації, загалом оцінюється наступним чином:

1. *Низький рівень євтрофікації (EI < 1,0).* Екосистема водоймища має високу стійкість проти євтрофікації. Водоймище слабо піддається зростанню водоростей та інших евтрофікаційних процесів.

2. *Середній рівень євтрофікації (1,0 < EI < 2,0).* Екосистема водоймища має середню стійкість проти євтрофікації. Водоймище може періодично піддаватися зростанню водоростей та інших евтрофікаційних процесів, але ще не досягло критичної точки.

3. *Високий рівень євтрофікації (EI > 2,0).* Екосистема водоймища має низьку стійкість проти євтрофікації. Водоймище піддається сильному зростанню водоростей та інших евтрофікаційних процесів, що може привести до зниження якості води та втрати біорізноманіття.

В даному дослідженні, середнє значення EI = 1,0, тобто, водоймище має високу стійкість

*Таблиця 2*

**Показники параметрів, розрахунок EI**

| Дата | 01.24 | 02.24 | 03.24 | 04.24 | 05.24 | 06.24 | 07.24 | 08.24 | 09.24 | 10.24 | 11.24 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $NO_3$- | 2 | 1,94 | 1,98 | 2,37 | 2,49 | 1,24 | 1,29 | 1,43 | 1,32 | 1,43 | 1,34 |
| $PO_4$- | 0,3 | 0,29 | 0,29 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,08 | 0,22 | 0,78 | 0,55 | 0,54 |
| EI | 1,15 | 1,115 | 1,135 | 1,22 | 1,27 | 0,65 | 0,685 | 0,825 | 1,05 | 0,99 | 0,94 |

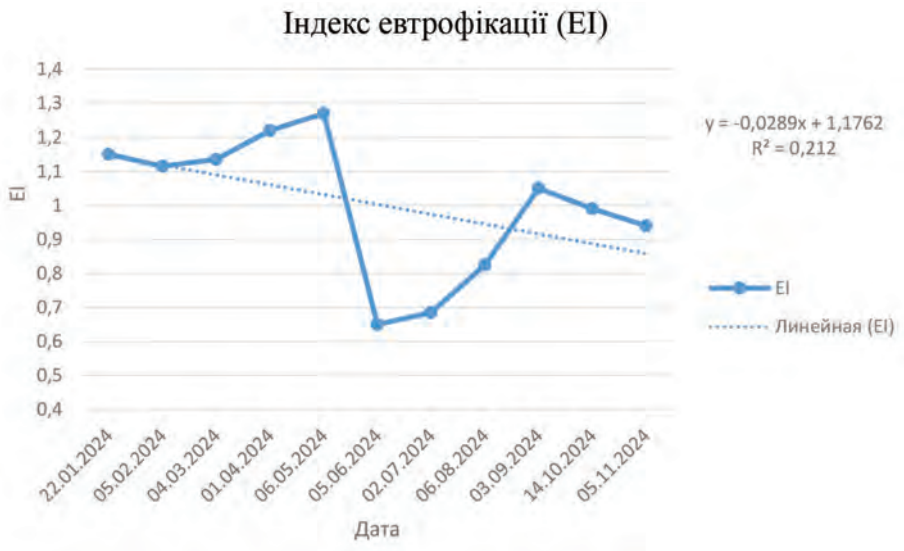



*Рисунок 4. Динамічна характеристика зміни індексу евтрофікації з часом (2024 р.)*

проти євтрофікації. Це означає, що екосистема водоймища відносно стабільна і мало піддається змінам, пов'язаним з євтрофікацією. Однак, потрібно пам'ятати, що цей індекс тільки один з багатьох факторів, що впливають на стійкість екосистеми.

Інші чинники, такі як температура, кислотність, коливання рівня води та діяльність людини, також можуть впливати на екосистему водоймища.

Наступні індекси які розраховані та проаналізовані в дослідженні, це індекс якості води (WQI) та індекс самоочищення (IS), що вимагає використання даних про якісний стан води, таких як концентрація забруднювальних речовин, показники біологічної активності, гідрохімічні та гідробіологічні параметри [9].

Для розрахунку WQI використовуються формула:

$$WQI = \frac{C}{ГДК} * 100$$

де: *C* – фактична концентрація показника в воді (мг/дм³),

*ГДК* – максимально допустима концентрація для цього показника (мг/дм³).

Значення показників: 1. Хімічного складу води (рівень забруднювальних речовин, наприклад, нітрати, фосфати, нафтопродукти, важкі метали тощо); 2. Гідробіологічні характеристики (кисневий режим, біохімічна потреба в кисні – БПК, кількість зоопланктону, фітопланктону тощо); 3. Фізико-хімічні показники (температура, каламутність, pH).

Дані посту спостереження р. Дніпро, 328 км, м. Запоріжжя, для аналізу та розрахунку Індексу WQI за період 2022-2024 років:

Амоній-іони: 0,19; 0,19; 0,22; 0,21; 0,29; 0,45; 0,45; 0,29; 0,31; 0,14; 0,18; 0,1; 0,11; 0,11; 0,14; 0,02; 0,18; 0,37; 0,38; 0,35; 0,29; 0,34; 0,1; 0,16 (мг/дм³). ГДК = 0,5 мг/дм³.

Біохімічне споживання кисню (БПК5): 2,1; 2; 2,2; 3,1; 3,8; 3,6; 3,5; 3,7; 3,9; 3,8; 3,2; 3,4; 3,4; 3; 3,5; 3,2; 3,1; 3,2; 3,8; 3,7; 3,2; 3,4; 3,4; 2,7 (мг/дм³). ГДК = 3 мг/дм³

Нітрат-іони: 0,98; 1,01; 1; 1,01; 1,02; 1,08; 1,27; 1,01; 1,14; 1,14; 1,26; 1,31; 1,24; 1,42; 1,55; 1,95; 2,2; 2,35; 0,96; 1,1; 1,16; 2,92 (мг/дм³). ГДК = 40 мг/дм³

Хлорид-іони: 32,1; 31; 34,6; 36,4; 31,9; 33,7; 35,5; 31; 29,2; 27,5; 32,8; 29,2; 29,2; 30,1; 37,2; 39; 38,14; 36,87; 34,7; 36,13; 34,74; 26,1; 27,8; 29,9 (мг/дм³). ГДК = 300 мг/дм³

Фосфат-іони: 0,26; 0,22; 0,21; 0,22; 0,23; 0,24; 0,24; 0,23; 0,24; 0,3; ,28; 0,27; 0,26; 0,27; 0,28; 0,3; 0,05; 0,05; 0,07; 0,07; 0,21; 0,7; 0,52; 00,52 (мг/дм³). ГДК = 0,5 мг/дм³ (можна використовувати для стандартних умов)

Нітрит-іони: ГДК = 0,08 мг/дм³ Дані: 0,04; 0,05; 0,07; 0,07; 0,07; 0,08; 0,05; 0,03; 0,04; 0,04; 0,04; 0,04; 0,05; 0,06; 0,05; 0,06; 0,04; 0,05; 0,04; 0,09; 0,06; 0,2; 0,02; 0,03 (мг/дм³).

Потім обчислюємо середнє значення індексу для окремих показників та для сукупності.

Розрахунок індексу WQI для кожного параметра:

*Амоній-іони*: максимальна концентрація 0,45 мг/дм³; мінімальна концентрація 0,02 мг/дм³); середня концентрація 0,24 мг/дм³. Індекс WQI: 0,51

Біохімічне споживання кисню (БПК5): максимальна концентрація 3,9 мг/дм³; мінімальна концентрація 2 мг/дм³; середня концентрація 3,2 мг/дм³. **Індекс WQI: 0,84**

*Нітрат-іони*: максимальна концентрація 2,92 мг/дм³; мінімальна концентрація 0,96 мг/дм³; середня концентрація 1,42 мг/дм³. **Індекс WQI: 0,04**

*Хлорид-іони*: максимальна концентрація 39 мг/дм³; мінімальна концентрація 26,1 мг/дм³ ; середня концентрація 32,4 мг/дм³. **Індекс WQI: 0,11**

*Фосфат-іони*: максимальна концентрація 0,7 мг/дм³; мінімальна концентрація 0,05 мг/дм³ ; середня концентрація 0,24 мг/дм³. **Індекс WQI: 0,51**

*Нітрит-іони*: максимальна концентрація 0,2 мг/дм³; мінімальна концентрація 0,02 мг/дм³; середня концентрація 0,06 мг/дм³. **Індекс WQI: 0,79**

Кінцевий індекс WQI розраховуємо як середнє значення індексів усіх параметрів:

$$WQI = (0,51 + 0,84 + 0,04 + 0,11 + 0,51 + 0,79) / 6 = 0,55$$

Тобто, у відсотковому відношенні, індекс WQI має значення 55. Це вказує про хорошу якість води (табл. 3). Однак, необхідно пам'ятати, що індекс WQI є оцінкою якості води тільки для певного набору параметрів і не може бути використаний самостійно для оцінки якості води.

Враховуючи, що індекс WQI нижче 60, води знаходяться в задовільному стані і можуть бути використані для потреб населення (середня якість

*Таблиця 3*

**Шкала якості води при різних значеннях WQI**

| Значення WQI | 0-25 | 25-50 | 50-75 | 75-100 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Характеристика | дуже погана якість води | погана якість води | середня якість води | хороша якість води | ідеальна якість води |

води). Проте, варто продовжувати контролювати якість води для запобігання зміни її стану.

Ще один показник, який можна використовувати в дослідженнях екологічної стійкості – це відмінність між гранично допустимим (С) ГДК) і фактичним станом середовища (С), яка складає екологічний резерв довкілля (ER). Цей показник характеризує здатність до відновлення або відтворення та є основою для розрахунку допустимих навантажень. Наприклад, припустимо, що С (ГДК) для певного параметра якості води (наприклад, сульфат-іони, мг/дм³) встановлено на рівні 100 мг/дм³. Після руйнації водосховища фактичний рівень кисню в воді зафіксований 31,1 мг/дм³. Тобто, показник ER = 100 – 31,1 = 68,9 (мг/дм³). Це приклад того, що існує екологічний резерв у кількості 68,9 мг/дм³ і екосистема має потенціал для відновлення.

Розрізняють два підходи визначення допустимих навантажень: санітарно-гігієнічний та екологічний. Вони розрізняються рівнем певних вимог. Наприклад, до критеріїв оцінки небезпеки поширення в навколишньому середовище різних видів забруднень відносять: гранично допустиму концентрацію (ГДК); гранично допустимий викид (ГДВ) і стрес-індекс; гранично допустимі екологічні навантаження (ГДЕН); максимально допустимий рівень (МДР); кризисні екологічні ситуації (КЕС) та показник екологічного резерву.

ГДК встановлюється головними санітарними інспекціями в законодавчому порядку або рекомендується відповідними організаціями, комісіями на основі результатів складних експериментів, а також відомостей, отриманих в час або після різних аварій, катастроф тощо.

Важливість показника ER має наступний сенс: наявність екологічного резерву є критично важливою для управління природними ресурсами та розробки ефективних стратегій відновлення та збереження екосистем. Чим більший екологічний резерв, тим більшою мірою, буде успішне відновлення екосистеми після руйнації. Визначення екологічного резерву також допомагає в оцінці ефективності заходів, спрямованих на пом'якшення наслідків руйнації та в плануванні майбутніх відновлювальних заходів.

**Висновки**

В сучасних умовах розвитку технологій оцінки рівня екологічної безпеки природно-територіального комплексу (ПТК), існує багато методів оцінки стійкості (індекс самоочищення, індекс евтрофікації, індекс якості води), але їх застосування має певні обмеження для коректного аналізу за рахунок відсутності повноцінних та регулярних даних моніторингу нижнього Дніпра. За результатами проведеної оцінки стійкості екосистеми нижнього Дніпра, виявлено, що здатність до самоочищення річки Дніпро демонструє стійкість, але з певними коливаннями: розрахунок індексу самоочищення (IS) показав, що річка має досить високу здатність до самоочищення, але її показники залежать від сезону та кількості опадів. Розрахунок індексу евтрофікації (EI) вказує на помірний рівень евтрофікації, тобто на відносну стійкість екосистеми. Вплив фосфатів на евтрофікацію виявився слабкішим, ніж нітратів. Значення якості води (WQI) біля Запоріжжя вказує на середню якість води та задовільний стан, але потребує постійного контролю. Хоча розраховані індекси надають корисні відомості, вони не дають повної інформації стосовно рівня екологічної безпеки ПТК. Результати розрахунків слід розглядати як частину комплексної оцінки, а не як визначальний фактор. При розрахунках, кореляція між різними показниками була неоднозначна, що тільки підкреслює складність взаємозв'язків в екосистемі. Саме тому, оцінка стійкості екосистеми вимагає детальніших подальших досліджень з використанням повноцінного набору даних і більш складних моделей.

**Список використаних джерел**

1. Суходольська І.Л, Грубінко В. В. Основні підхід до оцінювання стійкості водних екосистем. Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер. Біол., 2021. Т 81, № 35. С. 55–69. https://doi.org/10.25128/2078-2357.21.3.8

2. Azarov, S. I., & Zadunaj, O. S. (2020). Аналіз методичних підходів до оцінювання стійкості екосистем. Екологічна безпека та природокористування, 34(2), 99–110. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.2.99-110

3. Гавриленко О.Т. Геоекологічне обґрунтування проектів природокористування: Навч. посіб. – К.: Ніка-Центр, 2003. – С. 22.

4 Грачев А. Карти України. Екологія, 2021 https://geomap.land.kiev.ua/ecology-10-2.html

5. Wang, K., Zhai, X. The creation of «Ecosystem Core» hypothesis to explain ecosystem evolution. BMC Ecol 19, 33 (2019). https://doi.org/10.1186/s12898-019-0251-y

6. Chapin FS, Matson PA, Vitousek PM. Principles of terrestrial ecosystem ecology, 2nd ed. New York: Springer, 2011.

7. Odum EP. Fundamentals of ecology, 3rd ed. New York: Saunders, 1971c.

8. Moein Khaligh, Guilhem Sommeria-Klein, Didier Gonze,Karoline Faust,Leo Lahti. Quantifying the impact of ecological memory on the dynamics of interacting communities June 3, 2022, https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1009396

9. Метод комплексних індексів. Он-лайн навчальний посібник. https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/1175235/45 -43-56.pdf

10. Державне агентство водних ресурсів України. Моніторинг та екологічна оцінка водних ресурсів України.. http://monitoring.davr.gov.ua/EcoWaterMon/GDKMap/Index