

Техноємність та екологічна стійкість міських водних об'єктів Києва

Павло Старжинський, аспірант¹ (ORCID: 0009-0004-4495-9309),

Ігор Прокопенко, аспірант¹ (ORCID: 0009-0009-0129-3283)

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

АНОТАЦІЯ

Запропоновано метод оцінювання техноємності (ІТЕ) та екологічної стійкості міських водних об'єктів на прикладі р. Дніпро в межах Києва. Підхід поєднує індекс забруднення води (ІЗВ), біотичні індикатори та ІТЕ, що відображає здатність системи протистояти техногенному навантаженню. Досліджено три секції міського градієнта (вище, у межах і нижче Києва) за допомогою ГІС і непараметричних тестів. Виявлено «гарячі точки» зі зниженим ІТЕ (<0,4) та підвищеним ІЗВ (>3,5), пов'язані з техногенними впливами та поверхневим стоком. Розроблено матрицю управлінських рішень для модернізації очисних споруд і впровадження зелених інфраструктур. Інструментарій придатний для проектування інженерних мереж і підвищення екологічної безпеки.

Ключові слова: урбанізовані водні об'єкти; індекс техноємності (ІТЕ); індекс забруднення води (ІЗВ); міське водовідведення; зелені інфраструктури; р. Дніпро; Київ.

1. ВСТУП

Інтенсивна урбанізація в містах Центрально-Східної Європи, таких як Київ, Варшава чи Будапешт, трансформує гідрологічний режим водозборів, фрагментує екосистеми та підвищує навантаження на водну інфраструктуру. У постсоціалістичних містах із застарілою інфраструктурою, сформованою в радянський період, ці проблеми особливо гострі. На урбанізованих ділянках Дніпра в межах Києва це проявляється у зниженні асиміляційної здатності, накопиченні забруднень у прибережній зоні та ускладненнях для функціонування інженерних мереж [1; 2].

Традиційні методи оцінки, як-от гідрохімічний моніторинг або біотичні індикатори, дають фрагментарну картину, не враховуючи інфраструктурний контекст. Рамки, такі як Water Sensitive Cities Index [3], рідко адаптовані до умов міст із змішаною інфраструктурою. У роботі запропоновано індекс техноємності (ІТЕ) у поєднанні з ІЗВ та біотичними індикаторами для оцінки просторової стійкості водного середовища Києва. Дослідження базується на концепції міського градієнта (див. Рис.1) [4], що дозволяє порівняти урбанізовані та контрольні ділянки.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Досліджено 15-кілометрову ділянку Дніпра в межах Києва на трьох секціях: вище міста (~897 км), урбан-ядро (~870–854,5 км), нижче міста (~825 км). Використано гідрохімічні дані 2024 року від Держводагентства України та місцевих екологічних служб, оброблені в QGIS 3.34.4. Комплекс показників включає:

ІЗВ за вісьмома параметрами (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , BCK_5 , TSS, Cl_2 , SO_4^{2-});

біотичні індикатори, зокрема індекс Шеннона (H'), що відображає різноманіття гідробіонтів;

ІТЕ, розрахований як відношення рівня забруднення до біотичного різноманіття з урахуванням інфраструктурного навантаження.

Просторові відмінності перевіряли критерієм Крускала–Волліса ($\alpha=0,05$) із парними порівняннями Манна–Вітні.

«Гарячі точки» визначали як зони з ІЗВ >3,5 та ІТЕ <0,4, прив'язані до випусків, дощової каналізації та зон акумуляції стоку.

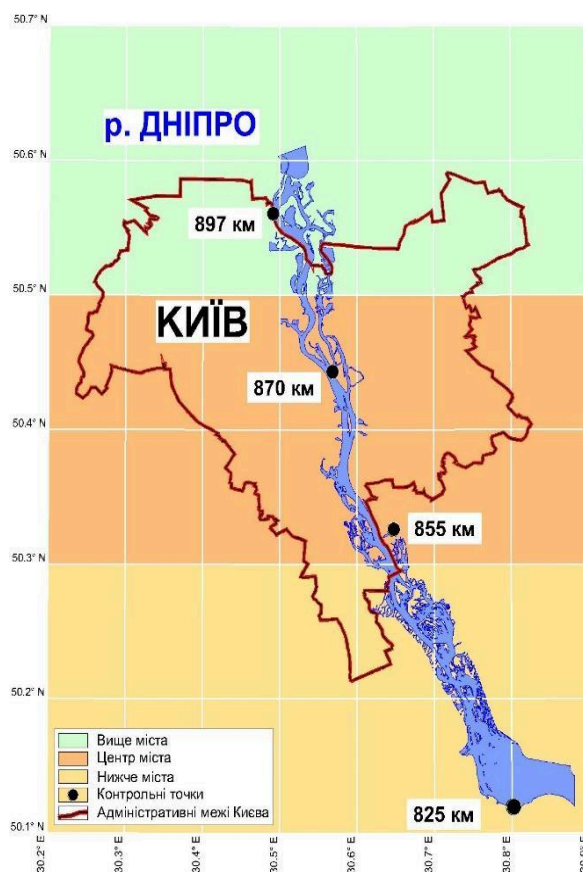


Рисунок 1. Просторове відображення міського градієнту з контрольними точками

3. РЕЗУЛЬТАТИ

У межах урбан-ядра ІЗВ становив 4,2–5,1 (клас якості III–IV за національною класифікацією), ІТС знижувався до 0,3–0,4, що вказує на обмежену стійкість. Нижче міста ІЗВ зменшувався до 3,0–3,5, ІТС зростав до 0,5–0,6, але фонові забруднення залишалися підвищеними. «Гарячі точки» збігаються з випусками каналізації та зонами інтенсивного стоку. Статистичні тести підтвердили значущі відмінності ($p < 0,05$). Карти ризиків (ІЗВ↑ & ІТС↓) локалізували вразливі прибережні ділянки, схильні до вторинного забруднення через ресуспензію осаду.

4. ОБГОВОРЕННЯ

Результати вказують на потребу модернізації інфраструктури в урбан-ядрі, де ІТС (0,3–0,4) свідчить про знижену здатність до самоочищення. Пріоритетними є локальне очищення поверхневого стоку та оновлення очисних споруд із впровадженням посиленої нітрифікації, денітрифікації та видалення фосфатів. Онлайн-моніторинг параметрів (NH_4^+ , NO_2^- , PO_4^{3-} , BCK_5 , TSS) зменшить екологічну інерційність [2; 6].

Природоорієнтовані рішення, як-от зелені дахи, дощові сади, біоканави та пермеабельні покриття, скоротять неорганізований стік. Наприклад, дощові сади у Варшаві знизили стік на 30–40% [6]. У Києві такі рішення доцільні в районах Подолу, Оболоні та Лівобережжя, де високий поверхневий стік через щільну забудову. Інтеграція екологічних коридорів і буферних зон у містобудування зменшить вторинне забруднення в приуловних зонах із депонуванням фосфатів. Наприклад, ревіталізація прибережних зон із відновленням водно-болотних біотопів може слугувати природним фільтром для зменшення надходження завислих речовин.

Публічний моніторинг із мобільними логерами (каламутність, DO, температура) та відкритими дашбордами підвищить прозорість управління і залучить громади [6]. Досвід Ірпені, де фітобентос реагував на підвищену каламутність і евтрофікацію через руйнування гідротехнічних споруд [7], підкреслює потребу в адаптивному підході. У воєнний час ІТС дозволяє оцінювати стійкість до змішаних стресорів, таких як руйнування інфраструктури чи неконтрольовані скиди. Наприклад, локальний моніторинг параметрів NH_4^+ і PO_4^{3-} у зонах потенційних скидів може запобігти екологічним кризам.

5. НОВИЗНА ДОСЛІДЖЕННЯ

Розроблено інтегровану рамку оцінки (ІЗВ + ІТС + біотичні індикатори) на основі організації міського градієнта. Запропоновано матрицю рішень для модернізації очисних споруд, впровадження зелених інфраструктур і адаптивного моніторингу з геоприв'язкою. ІТС ефективніше за Water Sensitive Cities Index [3] відображає стійкість до техногенних навантажень у містах зі змішаною інфраструктурою. Підхід придатний для сценарного моделювання та проектної практики, полегшуючи локалізацію проблемних ділянок.

6. ВИСНОВКИ

Інтегральна оцінка виявила знижену стійкість в урбан-ядрі Києва (ІТС 0,3–0,4, ІЗВ 4,2–5,1) та локалізувала «гарячі точки», пов'язані з техногенними впливами та стоком. ІТС інтегрує гідохімічні, біотичні та інфраструктурні чинники, заповнюючи прогалину між екологічною оцінкою та проектними вимогами. Методика обґрунтовує інвестиційні пріоритети, зокрема модернізацію очисних споруд, впровадження зелених інфраструктур і адаптивний моніторинг.

Адаптація методики до другорядних водотоків, таких як річки Либідь чи Дарниця, враховує їхню специфіку: меншу течію, вищий рівень локального забруднення через неорганізований стік і промислові скиди. Наприклад, для р. Либідь доцільно оцінювати накопичення органічних речовин через низьку проточність. У воєнний час методика оцінює стійкість до стресів, таких як руйнування гідротехнічних споруд чи неконтрольовані скиди, що актуально для регіонів із пошкодженою інфраструктурою.

Підхід придатний для техніко-економічних обґрунтувань, екологічних паспортів, експлуатаційної документації водоканалів і планування міського розвитку. У перспективі методику можна масштабувати на інші міста України, такі як Харків чи Дніпро, для аналізу водних екосистем у контексті кліматичних змін і воєнних викликів. Це сприятиме підвищенню екологічної безпеки та стійкості міських водних об'єктів у довгостроковій перспективі.

Список літератури

- [1] McDonnell M. J., Pickett S. T. A. Ecosystem structure and function along urban–rural gradients: an unexploited opportunity for ecology. *Ecology*, 1990, vol. 71, no. 4, pp. 1232–1237.
- [2] Baudoin L., Gittins J. R. The ecological outcomes of collaborative governance in large river basins: who is in the room and does it matter? *Journal of Environmental Management*, 2021, vol. 281, p. 111836.
- [3] CRC for Water Sensitive Cities. *Water Sensitive Cities Index: Benchmarking for Resilience*, Melbourne: CRCWSC, 2023. [Online]. Available: <https://watersensitivecities.org.au>
- [4] Whittaker R. H. Gradient analysis of vegetation. *Biological Reviews*, 1967, vol. 42, no. 2, pp. 207–264.
- [5] Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 1948, vol. 27, pp. 379–423.
- [6] Ali S., Bhatti Z. A., et al. Integrating Real-Time Monitoring and Public Dashboards for Urban Water Quality: A Case Study. *Water*, 2024, vol. 16(5), p. 872. <https://doi.org/10.3390/w16050872>
- [7] Yemelianova T. O., Bilous A. O., et al. Impact of War-Related Stressors on Phytobenthos and Macrophytes in the Irpin River (Ukraine). *Water*, 2023, vol. 15(19), p. 3471. <https://doi.org/10.3390/w15193471>.