

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

<https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-09>

УДК 504.06:628.1:620.9:711.4:519.876

В. К. ПУЗІК,¹ д-р с.-г. наук, чл.-кор. НААН, заслужений діяч науки і техніки України,
професор кафедри екології та біотехнологій в рослинництві

e-mail: kysmish@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3890-6150>

Є. А. КРИШТОП,¹ канд. с.-г. наук,

доцент кафедри екології та біотехнологій в рослинництві

e-mail: kafagroeco@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2868-3101>

¹ Державний біотехнологічний університет,
вул. Алчевських, 44, Харків, 61002, Україна

МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО ПОРІВНЯЛЬНОЇ ОЦІНКИ ВОДНО-ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ НА ОСНОВІ DPSIR, ESG ТА IWE

Мета. Розробити та апробувати методичний підхід до порівняльної оцінки водно-енергетичної стійкості урбанізованих територій на основі поєднання моделі DPSIR, ESG-індикаторів та інтегрального індексу IWE.

Методи. Використано поєднання концептуального та кількісного підходів. Для структуризації взаємозв'язків між ресурсним навантаженням, станом міського середовища та управлінськими відповідями застосовано модель DPSIR (Driving forces – Pressures – State – Impact – Response). ESG-підхід використано для відбору показників, пов'язаних з екологічною результативністю та інфраструктурною модернізацією міських систем. Кількісну оцінку виконано за допомогою інтегрального індексу IWE (Integrated Water-Energy Sustainability Index), який обчислювали методом зваженої адитивної згортки з мін-макс нормалізацією показників.

Результати. До складу інтегрального індексу включено п'ять індикаторів: втрати води в мережах, енергоємність житлового фонду, питомі викиди CO₂, частку відновлюваних джерел енергії та рівень очищення стічних вод. Апробацію методики виконано на прикладі чотирьох великих міст України – Києва, Львова, Харкова та Дніпра. Для перевірки стійкості моделі проведено аналіз чутливості шляхом варіювання вагових коефіцієнтів. Найвище значення індексу зафіксовано для Львова, що зумовлено нижчою енергоємністю житлового фонду, найнижчими питомими викидами CO₂, вищою часткою відновлюваних джерел енергії та найвищим рівнем очищення стічних вод серед досліджуваних міст. Найнижче значення отримано для Харкова, що пов'язано з найбільшими втратами води, найвищою енергоємністю житлового фонду, вищими питомими викидами CO₂ та найнижчою часткою відновлюваних джерел енергії. Київ і Дніпро продемонстрували проміжні значення індексу. Аналіз чутливості показав, що варіювання вагових коефіцієнтів у межах заданих сценаріїв не змінює підсумкового ранжування міст, що свідчить про відносну стійкість моделі. Встановлено, що найбільший вплив на міжміську диференціацію індексу мають показники, пов'язані з енергетичним переходом та екологічною інфраструктурою, насамперед частка відновлюваних джерел енергії та рівень очищення стічних вод.

Висновки. Запропонований методичний підхід дає змогу поєднати водний та енергетичний компоненти міської стійкості в межах єдиної кількісної схеми оцінювання. Інтегральний індекс може застосовуватися як інструмент порівняльного аналізу урбанізованих територій, муніципального моніторингу ресурсоефективності та визначення пріоритетів модернізації водної й енергетичної інфраструктури. Практична цінність підходу полягає в можливості його використання за умов обмеженої доступності уніфікованих муніципальних даних.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: водно-енергетичний зв'язок, водно-енергетична стійкість, DPSIR, ESG, інтегральний індекс IWE, урбанізована територія

Як цитувати: Пузік В. К., Криштоп Є. А. Методичний підхід до порівняльної оцінки водно-енергетичної стійкості урбанізованих територій на основі DPSIR, ESG ТА IWE. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2026. Вип. 34. С. 125-135. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-09>

In cites: Puzik, V. K., & Kryshchok, Y. A. (2026). A methodological approach to comparative assessment of water–energy sustainability of urbanized areas based on DPSIR, ESG and IWE. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, (34), 125-135. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-09> (in Ukrainian)

Вступ

Урбанізовані території концентрують основні потоки споживання водних і енергетичних ресурсів та водночас формують значну частку антропогенного навантаження на довкілля. Зростання чисельності міського населення, зношеність інженерної інфраструктури, підвищення енергоємності житлового фонду, збільшення обсягів стічних вод і викидів парникових газів актуалізують потребу в інструментах оцінювання, які дають змогу аналізувати міські ресурсні системи комплексно, а не в межах окремих секторів [1–6].

У сучасній науковій літературі взаємозв'язок водних та енергетичних ресурсів розглядається в межах концепції water–energy nexus. У праці Bazilian et al. [7] обґрунтовано необхідність інтегрованого підходу до моделювання взаємопов'язаних ресурсних систем, що дозволяє враховувати міжсекторальні ефекти при прийнятті управлінських рішень. Lund et al. [8], розвиваючи концепцію smart energy systems, показали, що ефективне управління міськими системами потребує узгодження енергетичних потоків, інфраструктури та режимів споживання. У роботі Ramos et al. [9] увагу зосереджено на управлінських стратегіях водно-енергетичного зв'язку в розумних містах, зокрема на інфраструктурних рішеннях, спрямованих на підвищення ресурсоефективності.

Окремий напрям досліджень стосується оцінювання водної та енергетичної ефективності інфраструктури. Alegre et al. [10] запропонували систему індикаторів для оцінки функціонування систем водопостачання, що створює підґрунтя для порівняльного аналізу міських мереж. Connolly et al. [11] розглянули технічні та економічні аспекти інтеграції відновлюваної енергетики в європейські енергетичні системи, а Kazmierczak and Carter [12] та Kabisch et al. [13] показали значення природоорієнтованих рішень для підвищення стійкості міського середовища. У сукупності ці праці демонструють, що водний та енергетичний компоненти міської стійкості тісно пов'язані, однак у більшості випадків аналізуються в різних дослідницьких рамках.

Останніми роками зростає увага до використання ESG-підходів у сфері управління ресурсами. У дослідженні Chen et al. [14] ESG-фактори розглядаються як важливий елемент оцінювання ризиків у взаємопов'язаних ресурсних системах. Водночас стандарти GRI [15] надають інструментарій для формалізації екологічних показників у практиці звітності та моніторингу. Однак застосування ESG у міському ресурсному аналізі переважно має концептуальний характер і лише частково реалізоване у вигляді систем кількісних індикаторів, придатних для міжміського порівняння.

Таким чином, аналіз літератури свідчить про наявність кількох невирішених питань. По-перше, у наявних дослідженнях відсутній узгоджений інструмент, який би інтегрував водний і енергетичний сектори міста в єдину кількісну метрику. По-друге, більшість підходів орієнтована або на національний рівень, або на окремі інфраструктурні підсистеми, що ускладнює їх застосування для порівняльної оцінки урбанізованих територій. По-третє, ESG-компонент у більшості робіт не інтегровано безпосередньо в систему показників оцінювання водно-енергетичної стійкості міст.

Метою є розроблення та апробація методичного підходу до порівняльної оцінки водно-енергетичної стійкості урбанізованих територій на основі поєднання моделі DPSIR, ESG-індикаторів та інтегрального індексу IWE на прикладі чотирьох міст України.

Наукова новизна роботи полягає у формалізації підходу до оцінювання водно-енергетичної стійкості міст, у межах якого поєднано логіку DPSIR, систему ESG-показників та інтегральний індекс IWE як інструмент порівняльного аналізу на міському рівні. На відміну від індексів, що орієнтовані переважно на макrorівень або окремі ресурсні підсистеми, запропонований підхід спрямований на інтегровану оцінку водного та енергетичного компонентів у межах урбанізованої системи.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання запропонованого підходу для муніципаль-

ного моніторингу ресурсоефективності, порівняльної оцінки міських систем за умов обмеженої доступності уніфікованих даних, а

також для обґрунтування пріоритетів модернізації водної та енергетичної інфраструктури.

Методика дослідження

Для порівняльної оцінки водно-енергетичної стійкості урбанізованих територій використано комбінований методичний підхід, який поєднує концептуальне структурування показників у межах моделі DPSIR (Driving forces – Pressures – State – Impact – Response) [16], їх інтерпретацію з позицій ESG-підходу та подальше агрегування в інтегральний індекс IWE (Integrated Water-Energy Sustainability Index). Така схема дає змогу перейти від якісного опису стану міських ресурсних систем до їх кількісної порівняльної оцінки за єдиним набором індикаторів.

У межах методики DPSIR використано для логічного групування показників за трьома функціональними блоками: ресурсний тиск на систему, екологічний стан та управлінська відповідь. ESG-підхід застосовано як рамку для добору показників, пов'язаних з екологічною результативністю міської інфраструктури, ресурсоефективністю та модернізаційними рішеннями. До складу індексу IWE включено п'ять індикаторів, які відображають водний та енергетичний компоненти стійкості міста (табл. 1).

Таблиця 1

Система індикаторів інтегрального індексу IWE

Table 1

System of indicators of the integrated IWE index

Позначення	Індикатор	Одиниця виміру	Тип показника	Компонент DPSIR	ESG-вимір	Джерельна основа
X ₁	Втрати води в мережах	%	дестимулятор	Pressure	E	IWA, Держстат, звіти водоканалів
X ₂	Енергоємність житлового фонду	кВт·год/м ²	дестимулятор	Pressure	E	IEA, аналітичні оцінки, статистичні матеріали
X ₃	Питомі викиди CO ₂	т/особу	дестимулятор	State	E	IEA, C40
X ₄	Частка ВДЕ	%	стимулятор	Response	E/G	IRENA, Eurostat
X ₅	Рівень очищення стічних вод	%	стимулятор	Response	E/G	ЕЕА, Держстат, галузеві звіти

Інформаційну базу дослідження сформовано на основі відкритих статистичних, аналітичних і методичних джерел. Для обґрунтування вибору показників та меж їх нормалізації використано матеріали International Energy Agency, C40 Cities Climate Leadership Group, European Environment Agency, International Renewable Energy Agency, Eurostat, International Water Association, Державної служби статистики України та інші відкриті джерела, наведені у списку літератури рукопису. Апробацію методики виконано на прикладі чотирьох великих міст України – Києва, Львова, Харкова та Дніпра. Їх вибір зумовлений значенням цих міст як великих урбанізованих центрів із різними параметрами водної та енергетичної інфраструктури, що дає змогу продемон-

струвати можливості порівняльного застосування індексу IWE. Вихідні значення індикаторів, використані для розрахунку інтегрального індексу, наведено в табл. 2.

Для забезпечення порівнюваності різних показників застосовано міні-макс нормалізацію. Граничні значення X_{min} та X_{max} встановлено на основі узагальнених статистичних та аналітичних джерел і використано як єдину benchmark-базу для всіх досліджуваних міст (табл. 3).

Нормалізацію виконано окремо для дестимулюючих і стимулюючих показників. Для дестимуляторів, збільшення яких свідчить про погіршення стану системи (втрати води, енергоємність, питомі викиди CO₂), використано формулу:

$$N_i = (X_{\max} - X_i) / (X_{\max} - X_{\min}).$$

Таблиця 2

Вихідні значення індикаторів для розрахунку IWE

Table 2

Input indicator values for IWE calculation

Місто	Втрати води X_1 , %	Енергоємність X_2 , кВт·год/м ²	CO ₂ X_3 , т/особу	ВДЕ X_4 , %	Очищення X_5 , %
Київ	28,0	145,0	4,20	18,0	82,0
Львів	32,0	130,0	3,60	24,0	88,0
Харків	38,0	160,0	5,10	11,0	74,0
Дніпро	35,0	155,0	4,80	14,0	78,0

Таблиця 3

Межі нормалізації показників інтегрального індексу IWE

Table 3

Normalization bounds of the integrated IWE index indicators

Індикатор	X_{min}	X_{max}	Джерело
Втрати води, %	10	50	IWA [10, 23]
Енергоємність, кВт·год/м ²	80	200	IEA [1]
CO ₂ , т/особу	2,0	8,0	IEA [1], C40 [2]
Частка ВДЕ, %	5	40	IRENA [22], Eurostat [19]
Рівень очищення, %	50	100	EEA [16]

Для стимуляторів, зростання яких інтерпретується як позитивна характеристика системи (частка ВДЕ, рівень очищення стічних вод), застосовано формулу:

$$N_i = (X_i - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}),$$

де X_i – фактичне значення i -го показника для відповідного міста; X_{min} та X_{max} – нижня і верхня межі нормалізації; N_i – нормалізоване значення показника в інтервалі від 0 до 1.

Після нормалізації показники агреговано в інтегральний індекс водно-енергетичної стійкості IWE методом зваженої адитивної згортки:

$$IWE = \sum (w_i \cdot N_i), i = 1 \dots n,$$

де w_i – ваговий коефіцієнт i -го індикатора; N_i – його нормалізоване значення; n – кількість показників.

У базовому сценарії використано вагові коефіцієнти, наведені в табл. 4. Їх розподіл відображає відносну значущість індикаторів у системі оцінювання: більшу вагу надано втратам води як прямому індикатору інфраструктурної неефективності, тоді як для енергоємності, викидів CO₂ та частки ВДЕ встановлено однакові ваги, що забезпечує баланс між енергетичним і кліматичним вимірами. Для показника очищення стічних вод використано дещо нижчу вагу через його вужче функціональне охоплення в межах інтегральної моделі.

Таблиця 4

Вагові коефіцієнти показників індексу IWE

Table 4

Weight coefficients of the IWE index indicators

Показник	Позначення	Вага w_i
Втрати води	X_1	0,25
Енергоємність житлового фонду	X_2	0,20
Питомі викиди CO ₂	X_3	0,20
Частка ВДЕ	X_4	0,20
Рівень очищення стічних вод	X_5	0,15
Сума		1,00

Для перевірки стійкості отриманих результатів проведено однофакторний аналіз чутливості. Він полягав у варіюванні ваг

окремих показників у межах $\pm 0,05$ із пропорційним коригуванням решти коефіцієнтів за умови збереження їх суми на рівні 1,00.

Для кожного сценарію повторно обчислювали значення індексу IWE та перевіряли, чи змінюється підсумкове ранжування міст. Такий підхід дає змогу оцінити залежність результатів від прийнятої структури ваг і визначити, наскільки стійкою є модель до зміни припущень щодо відносної важливості окремих індикаторів.

Розрахунок має ілюстративно-прикладний характер і спрямований на демонстра-

цію можливості використання індексу IWE для порівняльної оцінки урбанізованих територій в умовах обмеженої доступності уніфікованих муніципальних даних.

За такої постановки завдання індекс розглядається не як остаточна універсальна метрика, а як інструмент аналітичного впорядкування та порівняння ключових характеристик водно-енергетичної стійкості міських систем.

Результати дослідження та обговорення

На основі вихідних значень індикаторів, наведених у розділі Методика дослідження, для кожного з чотирьох міст виконано мін–макс нормалізацію показників та розраховано інтегральний індекс водно-енергетичної стійкості IWE. Нормалізовані

значення N_1 – N_5 , зважені внески окремих індикаторів у підсумкове значення індексу та отримані значення IWE наведено в табл. 5.

Отримані значення інтегрального індексу IWE варіюють у межах від 0,34 до 0,60, що вказує на помітну диференціацію

Таблиця 5

Розрахунок інтегрального індексу водно-енергетичної стійкості урбанізованих територій (IWE)

Table 5

Calculation of the integrated water-energy sustainability index (IWE)

Місто	Втрати води X_1 , %	Енергоємність X_2 , кВт·год/м ²	CO ₂ X_3 , т/особу	ВДЕ X_4 , %	Очищення X_5 , %	N_1 – N_5 (норм.)	$w_1 \cdot N_1$ – $w_5 \cdot N_5$	IWE
Київ	28,0	145,0	4,20	18,0	82,0	0,55; 0,46; 0,63; 0,37; 0,64	0,14; 0,09; 0,13; 0,07; 0,10	0,53
Львів	32,0	130,0	3,60	24,0	88,0	0,45; 0,58; 0,73; 0,54; 0,76	0,11; 0,12; 0,15; 0,11; 0,11	0,60
Харків	38,0	160,0	5,10	11,0	74,0	0,30; 0,33; 0,48; 0,17; 0,48	0,07; 0,07; 0,10; 0,03; 0,07	0,34
Дніпро	35,0	155,0	4,80	14,0	78,0	0,38; 0,38; 0,53; 0,26; 0,56	0,10; 0,08; 0,11; 0,05; 0,08	0,41

рівня водно-енергетичної стійкості досліджуваних урбанізованих територій. Найвище значення зафіксовано для Львова (0,60), найнижче – для Харкова (0,34), тоді як Київ і Дніпро посідають проміжні позиції з показниками 0,53 та 0,41 відповідно. Таким чином, навіть у межах обмеженої вибірки спостерігається суттєва міжміська варіативність за основними параметрами водної та енергетичної ефективності.

Для Києва відносно високе значення IWE зумовлене насамперед меншими втратами води порівняно з більшістю інших досліджених міст, а також відносно високим рівнем очищення стічних вод. Водночас частка відновлюваних джерел енергії залишається нижчою, ніж у Львові, що обмежує підсумкове значення індексу. У Львові найкращий результат забезпечується сукупністю кількох переваг: найнижчою серед досліджених міст енергоємністю житлового

фонду, найнижчим рівнем питомих викидів CO₂, найвищою часткою ВДЕ та найвищим рівнем очищення стічних вод. Це свідчить про більш збалансовану конфігурацію водного та енергетичного компонентів стійкості.

Для Харкова отримано найнижче значення IWE, що пояснюється несприятливим поєднанням одразу кількох показників: найбільшими втратами води, найвищою енергоємністю житлового фонду, найвищими питомими викидами CO₂ та найнижчою часткою відновлюваних джерел енергії серед досліджуваних міст. У Дніпрі зафіксовано проміжний результат: жоден із показників не є критично найгіршим, однак поєднання середніх або відносно слабких значень за кількома індикаторами одночасно формує нижчий інтегральний результат порівняно з Києвом і Львовом.

Структура зважених внесків у табл. 5 показує, що найбільший диференціальний

вплив на підсумковий індекс мають показники, пов'язані з енергетичним переходом та екологічною інфраструктурою, насамперед частка відновлюваних джерел енергії та рівень очищення стічних вод. Саме за цими індикаторами міжміські відмінності мають найбільшу вираженість, що істотно впливає на ранжування досліджуваних урбанізованих територій. Водночас показники втрат води та енергоємності житлового фонду визначають інфраструктурну ефективність систем і також суттєво впливають на підсумкові значення індексу.

Для узагальнення результатів розрахунку здійснено ранжування міст за значенням інтегрального індексу IWE (табл. 6). Отриманий рейтинг має вигляд: Львів > Київ > Дніпро > Харків. Він відображає не лише різницю у значеннях індексу, а й різну конфігурацію чинників, що формують водно-енергетичну стійкість міських систем.

Наведене ранжування дає змогу виявити пріоритетні напрями підвищення стійкості для кожного міста. Для Львова подальший потенціал пов'язаний переважно з утриманням і розвитком досягнутих параме-

Таблиця 6

Ранжування міст за інтегральним індексом водно-енергетичної стійкості

Table 6

Ranking of cities by the integrated water-energy sustainability index

Позиція	Місто	IWE	Ключові чинники позиції
1	Львів	0,60	Висока частка ВДЕ; найнижча енергоємність і CO ₂ ; найвищий рівень очищення стічних вод
2	Київ	0,53	Відносно нижчі втрати води та достатньо високий рівень очищення; нижча частка ВДЕ порівняно зі Львовом
3	Дніпро	0,41	Проміжні значення за більшістю показників; частка ВДЕ та рівень очищення є головними обмежувальними чинниками
4	Харків	0,34	Найвищі втрати води, найвища енергоємність і CO ₂ ; найнижча частка ВДЕ

трів ресурсоефективності. Для Києва одним із ключових резервів є підвищення частки ВДЕ в енергобалансі. Для Дніпра актуальними залишаються модернізація систем очищення стічних вод та посилення енергетичного переходу. Для Харкова найбільш критичними є зниження втрат води, підвищення енергоефективності житлового фонду та нарощування частки відновлюваної енергетики. Таким чином, індекс IWE дозволяє не лише ранжувати міста, а й визначати індивідуальні напрями управлінського реагування.

Для перевірки стійкості моделі до зміни вагових коефіцієнтів проведено однофакторний аналіз чутливості. Результати наведено в табл. 7. У межах базового сценарію та чотирьох варіантів варіювання ваг підсумкове ранжування міст не змінюється: у всіх

сценаріях зберігається послідовність Львів > Київ > Дніпро > Харків. Це свідчить про відносну стійкість отриманих висновків до помірної зміни структури ваг.

Зміна ваг окремих показників у межах $\pm 0,05$ призводить лише до незначних коливань абсолютних значень індексу, але не змінює відносних позицій міст. Найбільша чутливість спостерігається при зміні ваг показників, що характеризують втрати води та рівень очищення стічних вод, однак навіть у цих сценаріях загальна конфігурація результатів залишається сталою. Це дозволяє вважати запропонований індекс достатньо робастним для цілей порівняльного аналізу в межах заданої вибірки.

Таблиця 7

Результати аналізу чутливості інтегрального індексу IWE до варіювання вагових коефіцієнтів

Table 7

Sensitivity analysis results for the IWE index under varying weighting coefficients

Сценарій	Київ	Львів	Харків	Дніпро	Рейтинг міст
Базовий [0,25; 0,20; 0,20; 0,20; 0,15]	0,53	0,60	0,34	0,41	Л > К > Д > Х
S1: w ₁ = 0,30	0,53	0,59	0,35	0,42	Л > К > Д > Х
S2: w ₁ = 0,20	0,52	0,60	0,34	0,41	Л > К > Д > Х
S3: w ₄ = 0,25	0,52	0,60	0,34	0,41	Л > К > Д > Х
S4: w ₅ = 0,20	0,51	0,58	0,33	0,40	Л > К > Д > Х

Отримані результати підтверджують можливість використання інтегрального індексу IWE для порівняльної оцінки водно-енергетичної стійкості урбанізованих територій. Індекс дає змогу агрегувати різномірні показники водної, енергетичної та екологічної ефективності в єдину кількісну метрику, яка зберігає чутливість до міжміських відмінностей та дозволяє виявляти ключові обмежувальні чинники для кожної досліджуваної системи. У межах цієї апробації найкращі результати продемонстрували міста з вищим рівнем енергетичного переходу та екологічної інфраструктурної модернізації, тоді як нижчі позиції характерні для міст із більшими ресурсними втратами та вищою енергоемністю.

Отримані результати підтверджують доцільність використання інтегрального підходу до оцінки водно-енергетичної стійкості урбанізованих територій. На відміну від практики роздільного аналізу водного та енергетичного секторів, застосований у роботі підхід дозволив розглянути їх як взаємопов'язані компоненти єдиної міської ресурсної системи. Це особливо важливо для урбанізованих територій, де втрати води, енергоемність житлового фонду, структура енергопостачання та рівень очищення стічних вод формують не ізольовані, а взаємозалежні характеристики інфраструктурної стійкості.

Інтерпретація результатів у межах DPSIR-логіки показує, що включені до індексу IWE показники відображають різні функціональні аспекти міської системи. Втрати води в мережах та енергоемність житлового фонду характеризують ресурсний тиск на інфраструктуру, питомі викиди CO₂ – екологічний стан системи, а частка відновлюваних джерел енергії та рівень очищення стічних вод – управлінські відповіді, спрямовані на зниження екологічного навантаження та модернізацію міських сервісів. У такому трактуванні інтегральний індекс IWE дає змогу оцінювати не лише поточний рівень ресурсної ефективності, а й співвідношення між проблемними параметрами системи та інструментами їх компенсації.

Порівняльний розрахунок для Києва, Львова, Харкова та Дніпра засвідчив, що міжміська диференціація формується не одним домінуючим показником, а конфігурацією кількох індикаторів одночасно. Найвище значення IWE для Львова пов'язане з більш

збалансованим поєднанням енергоефективності, нижчих викидів CO₂, вищої частки ВДЕ та кращих параметрів очищення стічних вод. Для Харкова, навпаки, характерне накопичення несприятливих значень за кількома дестимулюючими показниками, що знижує підсумковий інтегральний результат. Таким чином, індекс IWE виявляє не лише рівень водно-енергетичної стійкості, а й тип проблемної конфігурації міської системи.

Отримані результати загалом узгоджуються з положеннями сучасних досліджень water–energy nexus. Зокрема, у праці Bazilian et al. обґрунтовано необхідність інтегрованого розгляду взаємопов'язаних ресурсних систем, а в дослідженні Ramos et al. показано значення управлінських стратегій для підвищення ефективності міських водно-енергетичних зв'язків [7, 9]. Разом із тим у зазначених роботах основна увага приділяється концептуальним або секторальним аспектам, тоді як питання побудови компактною кількісною метрики для міжміського порівняння висвітлене обмежено. У цьому контексті запропонований індекс IWE можна розглядати як інструмент операціоналізації nexus-підходу на рівні порівняльного міського аналізу.

Важливим результатом роботи є також інтеграція ESG-підходу в систему кількісного оцінювання. У дослідженні Chen et al. ESG-фактори розглядаються як значущий елемент аналізу ризиків у взаємопов'язаних ресурсних системах [14], однак у більшості таких підходів ESG залишається рамковою концепцією, а не безпосередньо інтегрованою частиною розрахункової моделі. У запропонованій методиці ESG-показники не використовуються декларативно, а включені до структури індексу через конкретні індикатори екологічної інфраструктури та енергетичного переходу. Це підвищує прикладну цінність моделі, оскільки дає змогу пов'язати порівняльну оцінку міст із практиками муніципального моніторингу та екологічно орієнтованого управління.

Порівняно з інтегральними індексами, орієнтованими переважно на національний рівень або широкий спектр макропоказників, запропонований підхід має кілька переваг. По-перше, він зосереджений саме на міському рівні, де інфраструктурні характеристики є більш релевантними для оцінки ресурсної стійкості. По-друге, він поєднує водний

та енергетичний блоки в межах єдиної моделі. По-третє, індекс IWE є достатньо компактним і може бути використаний за умов обмеженої доступності уніфікованих муніципальних даних. Саме ця компактність робить його зручним для апробаційного аналізу та для застосування в умовах, коли повні масиви локальної статистики недоступні або фрагментарні.

Водночас результати роботи слід інтерпретувати з урахуванням її обмежень. Насамперед це стосується використання узагальнених benchmark-діапазонів для нормалізації показників і застосування обмеженої вибірки міст. Крім того, не всі вихідні показники однаково забезпечені повними та уніфікованими муніципальними даними, що зумовлює певний рівень умовності при порівнянні. Важові коефіцієнти в базовому сценарії встановлено в межах авторської методичної схеми, тому, хоча аналіз чутливості й підтвердив стабільність ранжування, подальша верифікація моделі потребує тестування на розширених наборах даних і з використанням альтернативних процедур зважування.

Окремо варто підкреслити, що сильна сторона індексу IWE полягає не у претензії на універсальне заміщення інших підходів до оцінювання сталості, а у його здатності виконувати функцію прикладного аналітичного інструменту. Індекс може використовуватися для первинного порівняльного скринінгу міст, виявлення ключових слабких місць водної та енергетичної інфраструктури, а також

для попереднього обґрунтування напрямів модернізації. У цьому сенсі його практична цінність полягає у поєднанні відносної простоти розрахунку та аналітичної змістовності результату.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на кілька напрямів. По-перше, необхідною є апробація індексу IWE на більшій кількості міст із використанням стандартизованих муніципальних даних за зіставні часові інтервали. По-друге, перспективним є включення просторового компонента оцінювання, зокрема через поєднання індексу з GIS-аналізом для врахування територіальної неоднорідності міських систем. По-третє, доцільно перевірити, якою мірою зміна набору показників або застосування альтернативних методів вагового оцінювання впливає на стабільність моделі. Це дозволить підвищити аналітичну надійність індексу та розширити сферу його практичного застосування.

Загалом проведене дослідження показало, що поєднання DPSIR-моделі, ESG-підходу та інтегрального індексу IWE є продуктивним для порівняльної оцінки водно-енергетичної стійкості урбанізованих територій. Запропонована модель не претендує на вичерпне охоплення всіх параметрів міського розвитку, однак вона дозволяє впорядкувати ключові характеристики ресурсної ефективності в межах єдиної аналітичної схеми та створює підґрунтя для подальшого розвитку кількісних підходів до оцінювання стійкості міст.

Висновки

Запропоновано методичний підхід до порівняльної оцінки водно-енергетичної стійкості урбанізованих територій, який поєднує модель DPSIR, ESG-індикатори та інтегральний індекс IWE, дозволяє узгодити показники, що характеризують ресурсний тиск, екологічний стан і управлінські відповіді, в межах єдиної схеми кількісного аналізу.

Апробація індексу IWE на прикладі Києва, Львова, Харкова та Дніпра показала, що значення водно-енергетичної стійкості досліджуваних міст варіюють у межах від 0,34 до 0,60. Найвище значення індексу отримано для Львова, найнижче – для Харкова, тоді як Київ і Дніпро займають проміжні позиції. Отримане ранжування відображає міжміські відмінності

у поєднанні водної, енергетичної та екологічної ефективності.

Встановлено, що найбільший вплив на диференціацію значень інтегрального індексу мають показники, пов'язані з енергетичним переходом та екологічною інфраструктурою, насамперед частка відновлюваних джерел енергії та рівень очищення стічних вод. Поряд із цим суттєве значення для формування підсумкового результату мають втрати води в мережах та енергоємність житлового фонду, які відображають рівень інфраструктурної неефективності міських систем.

Аналіз чутливості показав, що за варіювання вагових коефіцієнтів у межах заданих сценаріїв підсумкове ранжування міст не змінюється, що свідчить про відносну стійкість

моделі до помірної зміни параметрів зважування. Це дає підстави розглядати індекс IWE як придатний інструмент для порівняльного аналітичного оцінювання водно-енергетичної стійкості урбанізованих територій.

Практичне значення запропонованого підходу полягає у можливості його використання для муніципального моніторингу ресурсоефективності, виявлення ключових обмежувальних чинників розвитку міської інфраструктури та обґрунтування пріоритетів модернізації

водного й енергетичного секторів. За умов обмеженої доступності уніфікованих даних індекс IWE може виконувати функцію прикладного інструменту первинної порівняльної оцінки міських систем.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з апробацією індексу IWE на ширшій вибірці міст, уточненням набору показників і вагових коефіцієнтів, а також інтеграцією просторового аналізу для врахування територіальної неоднорідності урбанізованих систем.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Авторі дотримувалися етичних норм, включаючи недопущення плагіату, фальсифікації даних і подвійної публікації.

Внесок авторів. Усі автори зробили рівний внесок у підготовку роботи.

Декларація про використання ШІ

Генеративні інструменти ChatGPT-5.5 (OpenAI, 2026) використовувалися для мовного редагування та технічного форматування тексту; зміст, аналіз і висновки належать авторам.

Список використаної літератури

1. International Energy Agency. World Energy Outlook 2023. Paris: IEA, 2023. 358 p. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023> (дата звернення 28.03.2026)
2. C40 Cities Climate Leadership Group. Deadline 2020: How Cities Will Get the Job Done. London: C40, 2020. 68 p. URL: <https://www.c40.org/researches/deadline-2020> (дата звернення 28.03.2026)
3. United Nations, Department of Economic and Social Affairs. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. New York: UN, 2019. 126 p. URL: <https://population.un.org/wup/> (дата звернення 28.03.2026)
4. UN-Habitat. World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme, 2022. 392 p. URL: <https://unhabitat.org/wcr/> (дата звернення 28.03.2026)
5. Кіптяч Ф. Я. Оцінка стану довкілля України: методи та результати. Регіональна економіка. 2025. № 2. С. 26–38. URL: https://re.gov.ua/re202502/re202502_026_KiptachFYa.pdf
6. Державна служба статистики України. Офіційні статистичні дані. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення 28.03.2026)
7. Bazilian M., Rogner H., Howells M., Hermann S., Arent D., Gielen D., Steduto P., Mueller A., Komor P., Tol R. S. J., Yumkella K. K. Considering the energy, water and food nexus: towards an integrated modelling approach. Energy Policy. 2011. Vol. 39. P. 7896–7906. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.039>
8. Lund H., Østergaard P. A., Connolly D., Mathiesen B. V. Smart energy and smart energy systems. Energy. 2017. Vol. 137. P. 556–565. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.123>
9. Ramos H. M., Giralt L., López-Jiménez P. A., Pérez-Sánchez M. Water-energy nexus management strategy towards sustainable mobility goal in smart cities. Urban Water Journal. 2023. Vol. 20, No. 10. P. 1406–1417. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2021.1973041>
10. Alegre H., Baptista J. M., Cabrera E., Cubillo F., Duarte P., Hirner W., Merkel W., Parena R. Performance indicators for water supply services. 3rd ed. London: IWA Publishing, 2016. 312 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/221936068_Performance_Indicators_for_Water_Supply_Services (дата звернення 28.03.2026)
11. Connolly D., Lund H., Mathiesen B. V. Smart energy Europe: the technical and economic impact of one potential 100 % renewable energy scenario for the European Union. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 60. P. 1634–1653. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.025>
12. Kazmierczak A., Carter J. Adaptation to climate change using green and blue infrastructure: a database of case studies. Manchester: University of Manchester, 2010. 42 p. URL: <https://www.grabs-eu.org/membersArea/files/databaseFinalReport.pdf> (дата звернення 28.03.2026)
13. Kabisch N., Korn H., Stadler J., Bonn A. (eds.). Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas. Cham: Springer, 2017. 337 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5>
14. Chen H., Zhang Y., Liu Z., Wang X., Li J. Assessing environmental, social, and governance risks in the water–energy–land–food nexus. Land. 2025. Vol. 14, No. 4. Article 669. <https://doi.org/10.3390/land14040669>

15. Global Reporting Initiative. GRI 303: Water and effluents 2018; GRI 302: Energy 2016. Amsterdam: Global Reporting Initiative, 2018. URL: <https://www.globalreporting.org/standards/> (дата звернення 28.03.2026)
16. European Environment Agency. DPSIR framework for state of the environment reporting. Copenhagen: EEA, 2022. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/92-9167-059-6-sum> (дата звернення 28.03.2026)

Стаття надійшла до редакції 03.04.2026
Стаття рекомендована до друку 07.05.2026

Переглянуто 05.05.2025
Опубліковано 30.05.2026

V. K. PUZIK¹, DSc (Agriculture),
Corresponding Member of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine,
Honored Worker of Science and Technology of Ukraine,
Professor of the Department of Ecology and Biotechnology in Crop Production
E-mail: kysmish@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3890-6150>

Y. A. KRYSHTOP¹, PhD (Agriculture),
Associate Professor of the Department of Ecology and Biotechnology in Crop Production
E-mail: kafagroeco@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2868-3101>

¹ State Biotechnological University,
44, Alchevskykh Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

A METHODOLOGICAL APPROACH TO COMPARATIVE ASSESSMENT OF WATER–ENERGY SUSTAINABILITY OF URBANIZED AREAS BASED ON DPSIR, ESG AND IWE

Purpose. To develop and test a methodological approach to the comparative assessment of water-energy sustainability of urbanized areas based on the integration of the DPSIR model, ESG indicators, and the integrated IWE index.

Methods. The study combines conceptual and quantitative approaches. The DPSIR model (Driving forces – Pressures – State – Impact – Response) was applied to structure the relationships between resource pressure, the condition of the urban environment, and management responses. The ESG approach was used to select indicators related to environmental performance and infrastructural modernization of urban systems. Quantitative assessment was carried out using the integrated IWE (Integrated Water-Energy Sustainability Index), calculated by a weighted additive aggregation method with min–max normalization of indicators.

Results. The index includes five indicators: water losses in distribution networks, energy intensity of the housing sector, specific CO₂ emissions, the share of renewable energy sources, and the wastewater treatment rate. The methodology was tested on four major Ukrainian cities: Kyiv, Lviv, Kharkiv, and Dnipro. A sensitivity analysis was performed by varying the weighting coefficients in order to assess the stability of the model. The highest IWE value was obtained for Lviv, which is associated with lower energy intensity of the housing sector, the lowest specific CO₂ emissions, a higher share of renewable energy sources, and the highest wastewater treatment rate among the studied cities. The lowest value was obtained for Kharkiv, due to the highest water losses, the highest energy intensity of the housing sector, higher specific CO₂ emissions, and the lowest share of renewable energy sources. Kyiv and Dnipro demonstrated intermediate values. The sensitivity analysis showed that varying the weighting coefficients within the defined scenarios did not change the final ranking of the cities, indicating the relative stability of the model. It was found that the greatest contribution to intercity differentiation of the index is made by indicators related to energy transition and environmental infrastructure, primarily the share of renewable energy sources and the wastewater treatment rate.

Conclusions. The proposed methodological approach makes it possible to integrate the water and energy components of urban sustainability within a unified quantitative assessment framework. The IWE index can be used as a tool for comparative analysis of urbanized areas, municipal monitoring of resource efficiency, and identification of priorities for modernization of water and energy infrastructure. The practical value of the approach lies in the possibility of its application under conditions of limited availability of standardized municipal data.

KEYWORDS: *water-energy nexus, water-energy sustainability, DPSIR, ESG, integrated IWE index, urbanized areas*

Conflict of Interest

The authors declares no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. Furthermore, the author have fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

Authors Contribution: all authors have contributed equally to this work

AI Statement

Generative ChatGPT-5.5 (OpenAI, 2026) tools were used for language editing and technical formatting of the text; the content, analysis, and conclusions are the authors'.

References

1. International Energy Agency. (2023). World Energy Outlook Paris: IEA Retrieved from <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
2. C40 Cities Climate Leadership Group. (2020). Deadline 2020: How Cities Will Get the Job Done. London: C40, 68 p. Retrieved from <https://www.c40.org/researches/deadline-2020>
3. United Nations, Department of Economic and Social Affairs. (2019). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. New York: UN, Retrieved from: <https://population.un.org/wup/>
4. UN-Habitat. (2022). World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme, . Retrieved from <https://unhabitat.org/wcr/>
5. Kiptach F. Ya. (2025). Assessment of the environmental state of Ukraine: methods and results. *Regional Economy*. (2), 26–38. Retrieved from https://re.gov.ua/re202502/re202502_026_KiptachFYa.pdf
6. State Statistics Service of Ukraine. Official statistical data. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/>
7. Bazilian M., Rogner H., Howells M., Hermann S., Arent D., Gielen D., Steduto P., Mueller A., Komor P., Tol R. S. J., Yumkella K. K. (2011). Considering the energy, water and food nexus: towards an integrated modelling approach. *Energy Policy*.39, 7896–7906. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.039>
8. Lund H., Østergaard P. A., Connolly D., Mathiesen B. V. (2017). Smart energy and smart energy systems. *Energy*. 137, 556–565. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.123>
9. Ramos H. M., Giralt L., López-Jiménez P. A., Pérez-Sánchez M. (2023). Water-energy nexus management strategy towards sustainable mobility goal in smart cities. *Urban Water Journal*. 20(10). 1406–1417. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2021.1973041>
10. Alegre H., Baptista J. M., Cabrera E., Cubillo F., Duarte P., Hirner W., Merkel W., Parena R. Performance indicators for water supply services. 3rd ed. London: IWA Publishing, 2016. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/221936068_Performance_Indicators_for_Water_Supply_Services
11. Connolly D., Lund H., Mathiesen B. V. (2016). Smart energy Europe: the technical and economic impact of one potential 100 % renewable energy scenario for the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 60, 1634–1653. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.025>
12. Kazmierczak A., Carter J. (2010). Adaptation to climate change using green and blue infrastructure: a database of case studies. Manchester: University of Manchester. Retrieved from <https://www.grabs-eu.org/membersArea/files/databaseFinalReport.pdf>
13. Kabisch N., Korn H., Stadler J., Bonn A. (Eds.). (2017). Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas. Cham: Springer, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5>
14. Chen H., Zhang Y., Liu Z., Wang X., Li J. (2025). Assessing environmental, social, and governance risks in the water–energy–land–food nexus. *Land*, 14(4), 669. <https://doi.org/10.3390/land14040669>
15. Global Reporting Initiative. (2018). GRI 303: Water and effluents 2018; GRI 302: Energy 2016. Amsterdam: Global Reporting Initiative, Retrieved from: <https://www.globalreporting.org/standards/>
16. DPSIR framework for state of the environment reporting. (2022). European Environment Agency. Copenhagen: EEA, Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/publications/92-9167-059-6-sum>

The article was received by the editors 03.04.2026
The article is recommended for printing 07.05.2026

The article was revised 05.05.2026
This article published 30.05.2026